

**Д.А. Шутов, Д.В. Ситанов**

**Процессы микро- и нанотехнологий**

**Лабораторный практикум**

**Часть 2**

**Иваново, 2006**

УДК 621.382

Шутов Д.А., Ситанов Д.В. Процессы микро- и нанотехнологий : Лабораторный практикум. Ч.2 / ГОУВПО Иван. гос. хим. – технол. ун-т. – Иваново, 2006. - 135 с. ISBN 5-9616-0177-3.

Вторая часть данного лабораторного практикума содержит описание и порядок выполнения шести базовых лабораторных работ по курсу «Процессы микро- и нанотехнологий», входит в комплект базовых учебных пособий по данному курсу, читаемому студентам специальности 210100 «Микроэлектроника и твердотельная микроэлектроника» и посвящен изучению технологий очистки материалов, получению тонких пленок на поверхности подложек, а также фотолитографии, технологии изготовления МДП – интегральных микросхем и планарно-эпитаксиальной технологии изготовления микросхем на биполярных транзисторах.

Каждое описание лабораторной работы содержит подробное теоретическое введение, описание лабораторного оборудования, порядок выполнения работы, лабораторное задание и перечень вопросов для самоподготовки.

При подготовке лабораторного практикума были использованы методические рекомендации и лабораторные образцы ЭЗ «Протон» г. Зеленоград.

Печатается по решению редакционно-издательского совета ГОУВПО Ивановского государственного химико-технологического университета

Рецензенты:

кафедра математики, экономической информатики и вычислительной техники Ивановского филиала Российского государственного торгового университета;

доктор технических наук Н.А. Коробов (Ивановская государственная текстильная академия)

ISBN 5-9616-0177-3

© ГОУВПО  
Ивановский государственный  
химико-технологический  
университет, 2006

## Содержание

<b>Лабораторная работа 7</b> <b>Материалы для полупроводниковых и гибридных интегральных микросхем</b> .....	<b>5</b>
Цель работы.....	5
Теоретические сведения.....	5
Описание лабораторного макета.....	13
Требования к отчету .....	13
Лабораторное задание .....	13
Порядок выполнения работы .....	14
Контрольные вопросы.....	14
<b>Лабораторная работа 8</b> <b>Очистка подложек</b> .....	<b>15</b>
Цель работы.....	15
Теоретические сведения.....	15
Описание лабораторного макета и оборудования.....	22
Требования к отчету .....	22
Лабораторное задание .....	23
Порядок выполнения работы .....	24
Контрольные вопросы.....	30
<b>Лабораторная работа 9</b> <b>Технологии получения тонких металлических пленок</b> .....	<b>32</b>
Цель работы.....	32
Теоретические сведения.....	32
Описание лабораторного макета.....	38
Требования к отчету .....	43
Лабораторное задание .....	43
Порядок выполнения работы .....	44
Контрольные вопросы.....	48
<b>Лабораторная работа 10</b> <b>Фотолитография</b> .....	<b>50</b>
Цель работы.....	50
Теоретические сведения.....	50
Описание лабораторного оборудования .....	59
Требования к отчету .....	60
Лабораторное задание .....	60
Порядок выполнения работы .....	61
Контрольные вопросы.....	63
<b>Лабораторная работа 11</b> <b>Изучение технологии изготовления МДП интегральных микросхем</b> .....	<b>64</b>
Цель работы.....	64
Теоретические сведения.....	64
Описание лабораторного оборудования .....	81
Требования к отчету .....	82
Лабораторное задание .....	82
Порядок выполнения работы .....	83
Контрольные вопросы.....	84
<b>Лабораторная работа 12</b> <b>Изучение планарно-эпитаксиальной технологии изготовления полупроводниковых микросхем на биполярных транзисторах</b> .....	<b>85</b>
Цель работы.....	85
Теоретические сведения.....	85
Описание лабораторного макета.....	109
Требования к отчету .....	109

Лабораторное задание .....	109
Порядок выполнения работы .....	110
Контрольные вопросы.....	111
<b>Приложение 5.</b> ....	113
Таблица П.1. ....	113
Основные операции технологического маршрута для изготовления структуры ИС на биполярных транзисторах (Изделие 1 – 133ЛА3). ....	113
Таблица П.2. ....	119
Основные операции технологического маршрута для изготовления структуры БИС на биполярных транзисторах (Изделие 2 - 1051ХА3).....	119
Таблица П.3. ....	129
Виды и причины дефектов (наиболее типичных) на различных операциях технологического процесса изготовления полупроводниковых микросхем на биполярных транзисторах.....	129
<b>Список рекомендуемой литературы</b> .....	136

## Лабораторная работа 7

### Материалы для полупроводниковых и гибридных интегральных микросхем

#### *Цель работы*

1. Изучить свойства исходных пластин (заготовок) для изготовления полупроводниковых интегральных микросхем.
2. Исследовать свойства подложек для изготовления гибридных интегральных микросхем

#### *Теоретические сведения*

##### *Термины и определения*

При изучении материала данной лабораторной работы использована терминология стандарта [1].

*Полупроводниковая интегральная микросхема* - микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объёме и на поверхности полупроводника.

*Полупроводниковая пластина* - заготовка из полупроводникового материала, используемая для изготовления полупроводниковых ИМС.

*Элемент интегральной микросхемы* - часть микросхемы, реализующая функцию какого-либо радиоэлемента, которая выполнена нераздельно от кристалла (подложки) и не может быть выделена как самостоятельное изделие. К электрорадиоэлементам относятся резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы и т.д.

*Плёночная интегральная микросхема* - интегральная микросхема, элементы которой выполнены в виде рисунка из плёнок с различными электрическими свойствами. Плёночные ИМС могут быть тонкоплёночными и толстоплёночными.

*Тонкоплёночная интегральная микросхема* - плёночная ИМС с толщиной плёнок до  $10^{-6}$  м. Элементы тонкоплёночной ИМС наносятся преимущественно методами термовакuumного осаждения, катодного (магнетронного) распыления.

*Толстоплёночная интегральная микросхема* - плёночная ИМС с толщиной плёнок свыше  $10^{-6}$  м. Элементы толстоплёночной интегральной микросхемы наносятся на подложку методами трафаретной печати (толстоплёночной технологии) путём продавливания паст (проводящих, диэлектрических, резистивных) через специальный сетчатый трафарет. Нанесённые на подложку пасты высушиваются, а затем вжигаются в подложку.

*Гибридная интегральная микросхема* - это плёночная ИМС, в которой часть элементов имеет самостоятельное конструктивное оформление. Такие элементы называются навесными. Например, плёночная ИМС, как правило, гибридная: в ней навесными являются активные элементы, а пассивные элементы (резистор, конденсатор) - из тонких или толстых плёнок.

#### *Полупроводниковые материалы*

##### *Основные требования*

Полупроводниковые материалы, применяемые для изготовления различных изделий микроэлектроники, должны отвечать ряду требований. Пригодность того или иного полупроводникового материала определяется его:

- кристаллической структурой,
- шириной запрещённой зоны,

- положением примесных уровней,
- однородностью распределения легирующих примесей по объёму.

Эксплуатационные характеристики готовых изделий определяются оптическими, термическими, термоэлектрическими и электрическими свойствами полупроводниковых материалов.

Особые требования предъявляют к таким свойствам полупроводниковых материалов, как тип электропроводности, концентрации введённой примеси, подвижность и время жизни носителя заряда.

Требования однородности легирования примесями всего объёма полупроводникового материала вытекают из необходимости обеспечить одинаковые электрические параметры всей партии приборов и ИМС, изготовленных на пластинах из одного слитка исходного материала.

Требования температуростойкости диктуются максимальными и минимальными рабочими температурами, при которых должны работать приборы и ИМС. Верхний предел рабочих температур зависит от ширины запрещённой зоны материала: чем она больше, тем больше верхний предел. Так, температуростойкость германиевых приборов равна 80-100<sup>0</sup>С, кремниевых 180-200<sup>0</sup>С, приборов из арсенида галлия 350<sup>0</sup>С, фосфида галлия 500<sup>0</sup>С, карбида кремния - до 700<sup>0</sup>С. Нижний предел рабочих температур полупроводниковых приборов определяется энергией ионизации легирующих примесей, которая при температурах до -60<sup>0</sup>С должна быть значительной.

Для изготовления высокочастотных приборов и ИМС необходим материал с высокой подвижностью носителей заряда, а для импульсных приборов - с малым временем жизни.

При выборе полупроводникового материала для фотоприборов руководствуются его спектральной чувствительностью. Основным параметром материалов для изготовления светоизлучающих приборов является длина волны излучения.

### Классификация

Полупроводниковые материалы по химическому составу можно разделить на простые (элементарные) и сложные.

**Элементарные полупроводники.** Из элементов третьей группы периодической системы Д. И. Менделеева полупроводником является бор. Из элементов четвёртой группы к типичным полупроводникам относятся кремний и германий. Углерод, его аллотропические видоизменения - алмаз и графит - также проявляют полупроводниковые свойства, хотя первый стоит ближе к изоляторам, а второй – к металлам. Среди элементов V-VII групп полупроводниковые свойства проявляют некоторые модификации фосфора, мышьяка, сурьмы, а также сера, селен, теллур. В полупроводниковой микроэлектронике в основном применяют германий и кремний, а остальные элементы используют в качестве легирующих добавок или компонентов сложных полупроводниковых соединений.

**Сложные полупроводники.** Среди сложных полупроводниковых соединений первое место занимают двойные (бинарные) соединения. Они классифицируются на  $A^{II}B^{VI}$ ,  $A^{II}B^V$ ,  $A^{III}B^V$ ,  $A_2^{III}B^V_3$  и т.д. В этих формулах верхние индексы обозначают номер группы периодической системы, а нижние – соответствующее число атомов в соединении. Например GaAs (арсенид галлия),  $Bi_2Te_3$  (теллурид висмута), GaP (фосфид галлия) и т.д. К сложным полупроводникам также относят твёрдые растворы из элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений, обладающих полупроводниковыми свойствами.

## Свойства полупроводниковых материалов

Основные свойства некоторых полупроводниковых материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики изучаемых материалов

Материал	Температура плавления, °С	Ширина запрещённой зоны при 300 <sup>0</sup> К, эВ	Подвижность носителей зарядов при 300 <sup>0</sup> К, см <sup>2</sup> /В·с	
			электронов	дырок
Кремний (Si)	1412	1,1	1350±10	480±15
Германий (Ge)	936	0,66	3800	1800
Арсенид галлия (GaAs)	1280	1,35	8800	400
Фосфид галлия (GaP)	1500	2,24	300	150

**Германий (Ge)** - чистый германий обладает металлическим блеском, довольно твёрд. Механическая обработка германия затруднена, а на обычных токарных, фрезерных и сверлильных станках вообще невозможна из-за его хрупкости. Поэтому германий обрабатывают алмазными и абразивными инструментами.

Кристаллический германий химически устойчив на воздухе при комнатной температуре, а при температуре выше 600<sup>0</sup> С окисляется до диоксида германия. В производстве полупроводниковых приборов и микросхем используют германий электронного и дырочного типа проводимости, обладающий удельным сопротивлением от 0,0001 до 45 Ом·см. Промышленностью выпускается германий различных марок, легированный галлием ГДГ-3, сурьмой ГЭС-0,16, золотом ГДЗ-0,6, мышьяком ГЭМ-0,005. В маркировке германия буквы обозначают: Г - германий, Д и Э - тип электропроводности (дырочный, электронный), З, Г, С и М - легирующая примесь (золото, галлий, сурьма, мышьяк). Цифра, стоящая после буквы, указывает удельное электрическое сопротивление материала. Тип электропроводности и удельное сопротивление германия определяются количеством введённых акцепторных и донорных примесей.

Пластины из германия применяются для создания дискретных диодов и транзисторов для гибридных ИМС и микросборок. Подвижность носителей заряда (электронов и дырок) в германии значительно выше, чем в кремнии, поэтому германиевые транзисторы по сравнению с кремниевыми при прочих равных условиях будут более высокочастотными.

Из-за сравнительно малой ширины запрещённой зоны (0,66 эВ при T=27<sup>0</sup>С) предельная рабочая температура составляет лишь 70-80<sup>0</sup>С, а устойчивая работа германиевых приборов возможна только при температурах на 20% меньших верхнего предела (из-за высокого температурного коэффициента ширины запрещённой зоны). Главные недостатки германия - неприменимость в планарной технологии из-за низкой температуры плавления, а вследствие этого и низкой скорости диффузии и отсутствия собственного стабильного окисла. В связи с этим германий не пригоден для массового производства ИМС.

**Кремний (Si)** - чистый кремний темнее германия, хотя полированные образцы имеют блеск стали. Подобно германию кремний обладает значительной хрупкостью.

При нормальных условиях поверхность кремния всегда покрыта тонкой плёнкой двуокси кремния ( $\sim 30\text{\AA}$ ). Кремний - самый распространённый после кислорода элемент: он составляет более 25% массы земной коры. Наиболее распространённым соединением кремния является диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ , который в природе встречается в виде минерала кварца. В свободном состоянии кремний в природе не встречается. Хотя кремний (элемент IV группы периодической системы) был открыт намного раньше германия, широкое применение в полупроводниковой электронике он нашёл лишь в последние 50 лет. Одной из причин почти монопольного применения кремния в полупроводниковых ИМС является тот факт, что кремний - единственный известный полупроводник, образующий термически выращиваемый окисел, который служит диэлектриком и химически стоек по отношению ко многим реактивам. Последнее обстоятельство используется для маскирования в процессе фотолитографии.

Верхний диапазон температур кремния достигает  $270^\circ\text{C}$ , а нижний предел – минус  $70^\circ\text{C}$ . В производстве микросхем кремний используется в виде пластин толщиной с средним 200 мкм и диаметром до 300 мм, шероховатость поверхности рабочей стороны соответствует 14 классу.

Промышленностью выпускается кремний различных марок. Поликристаллический кремний имеет удельное сопротивление от 10 до 130 Ом·см и изготавливается в виде стержней различных размеров. Из поликристаллического кремния получают монокристаллический кремний. Монокристаллический кремний общего назначения КЭФ и КДБ (К – кремний, Э и Д – электронного и дырочного типов электропроводности, Ф, Б, С и З – легированный фосфором, бором, сурьмой и золотом) выпускается пятнадцати групп (Таблица 2).

Таблица 2

Свойства монокристаллического кремния

№	Марка	Удельное сопротивление, Ом·см	Тип электропроводности	Легирующая примесь	Разброс удельного сопротивления, %	Группа
1	КЭФ	1-15	n	Фосфор	15	1 А
2	КДБ	1-20	p	Бор	20	1 Б
3	КЭФ	15-25	n	Фосфор	20	2 А
4	КДБ	25-40	p	Бор	25	2 Б
5	КЭФ	40-75	n	Фосфор	25	2 В
6	КЭФ	50-140	n	Фосфор	30	2 Г
7	КЭФ	100-250	n	Фосфор	30	2 Д
8	КДБ	500-2000	p	Бор	35	2 Е
9	КЭФ	0,005-1,0	n	Фосфор	35	3 А
10	КДБ	0,005-1,0	p	Бор	7	3 Б
11	КЭС	0,008-1,0	n	Сурьма	25	3 В
12	КЭС	0,005-1,0	n	Сурьма	25	4 А
13	КЭФЗ	3-18	n	Фосфор Золото	30	5 А
14	КЭФЗ	20-40	n	Фосфор Золото	30	5 Б
15	КЭФЗ	40-120	n	Фосфор Золото	40	5 В



Соединения типа  $A^{III}B^V$  образуются в результате взаимодействия элементов III группы (бора, алюминия, галлия, индия) с элементами V группы (азотом, фосфором, мышьяком, сурьмой). Атомы элементов II группы способны замещать атомы элементов III группы, а атомы элементов VI группы - атомы элементов V группы и проявлять донорные свойства. Наиболее часто в качестве акцепторных элементов используют цинк и кадмий, а в качестве донорных - селен и теллур. В полупроводниковом производстве наиболее часто применяют арсенид, фосфид и антимонид галлия и арсенид и антимонид индия.

**Арсенид галлия (GaAs)** - тёмно-серое вещество с металлическим блеском и фиолетовым оттенком. GaAs в настоящее время является лидером среди полупроводниковых соединений. Его универсальные по сравнению с германием и кремнием электрофизические свойства - большая ширина запрещённой зоны, малая эффективная масса, большая подвижность электронов и т.д. - определяют специфические области применения арсенида галлия. Он перспективен для изготовления туннельных и излучательных диодов, СВЧ-диодов и диодов Ганна, биполярных и полевых транзисторов, импульсных и переключающих приборов, варакторов (полупроводниковый диод, по принципу действия аналогичный варикапу) и инжекционных лазеров и т.д. Интегральные микросхемы на основе арсенида галлия из-за высокого быстродействия имеют большие преимущества в СВЧ-технике. Его недостатками являются: низкая растворимость легирующих примесей, отсутствие собственных оксидов со стабильными свойствами и образование вредных и токсичных для окружающей среды отходов при обработке.

**Фосфид галлия (GaP)** - оранжевые прозрачные пластины. Фосфид галлия принадлежит к перспективным полупроводниковым материалам. Они имеют самую большую ширину запрещённой зоны и низкую подвижность носителей зарядов, что позволяет создавать приборы с рабочей температурой p-n перехода до  $500^{\circ}C$ . Фосфид галлия применяют для создания полупроводниковых светоизлучающих приборов видимого диапазона (светодиодов), а также используют при изготовлении высокотемпературных выпрямителей, квантовых генераторов и усилителей. Основными недостатками фосфида галлия являются: отсутствие собственных оксидов со стабильными свойствами и образование токсичных соединений при химической и механической обработке.

#### *Пластины для гибридных интегральных микросхем*

Монолитные ИМС изготовляют на монокристаллических пластинах из различных полупроводниковых материалов, гибридные интегральные схемы (ГИС)-на пластинах из изоляционных материалов. Монокристаллические пластины и пластины из изоляционных материалов принято называть подложками.

#### *Общие требования к подложкам:*

- высокая механическая прочность при малых толщинах;
- высокие объёмное и поверхностное удельные сопротивления и малый тангенс угла диэлектрических потерь;
- температурные коэффициенты линейного расширения подложки и плёнок должны быть предельно согласованы;
- химическая инертность к осаждаемым веществам и травителям;
- физическая и химическая стойкость при нагреве до высоких температур;
- незначительное газовыделение в вакууме;
- хорошая адгезия с осаждаемой плёнкой;
- высокая теплопроводность;

- хорошая полируемость;
- низкая стоимость.

В общем, в качестве подложек можно себе представить практически любой материал, но в полной мере перечисленным требованиям не удовлетворяет ни одна подложка. Например, металлы (их удельное сопротивление примерно  $10^{-6}$  Ом·см) и полупроводники (от  $10^{-2}$  до  $10^9$  Ом·см) сильно уступают изоляторам, у которых удельное сопротивление достигает  $10^{14}$ - $10^{22}$  Ом·см. Металлы и полупроводники можно покрывать изолирующими плёнками, однако ценность их при этом невелика из-за паразитной ёмкости. Другая важная характеристика подложек - механическая прочность. По этому признаку можно исключить все неметаллические материалы. Требования по термостойкости фактически исключают органические пластмассы, которые испытывают деформации или разлагаются уже при температуре порядка  $250^{\circ}\text{C}$ . Наиболее удовлетворяют перечисленным требованиям неорганические соединения - аморфные, поликристаллические и монокристаллические, например, стекло, керамика, сапфир и др.

#### *Подложки ГИС*

Для тонкоплёночных ГИС наиболее широкое распространение получили ситалл и поликор, а также металлические подложки с изолирующим покрытием, гибкие подложки из полимерных материалов. Для толстоплёночных схем наиболее часто применяют керамические подложки. Основные параметры подложек ГИС приведены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры подложек ГИС

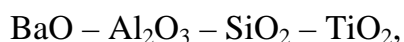
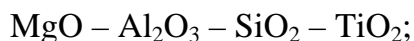
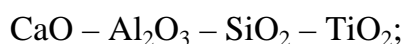
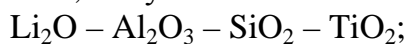
Материал подложки	$\varepsilon$ (f=1МГц, T=20 <sup>0</sup> C)	$\text{tg}\sigma \times 10^4$ (1МГц, 20 <sup>0</sup> C)	Коэффициент теплопроводности $\lambda \times 10^{-2}$ , Вт/(мград)	ТКЛР $\times 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>
Ситалл СТ-38-1	7,3 – 8,0	15	0,038	3,8
Сапфир	9,9	1	0,251	5,0 – 6,7
Поликор (99,8%)	9,8	1	0,251	7,5
А-995 (99,8%)	9,65	1	0,167	6,2
ГМ (99,6%)	9,8	1	0,167 – 0,251	8,0
Сапфирит (98%)	9,3 – 9,6	1	0,209 – 0,251	γ
22ХС (94,4%)	9,3	10	0,134	6,1
Брокерит (97%)	6,8	6	1,67	7,5 – 9,2
Кварц	3,78	1	0,059 – 0,096	0,55

Габаритные размеры тонкоплёночных подложек стандартизованы. Обычно на стандартной подложке групповым методом изготавливают несколько плат ГИС. Безотходное деление исходной подложки 48Х60 на части, кратные двум и трём, позволяет получить большое количество плат из одной подложки. Размеры подложек толстоплёночных ГИС не стандартизованы. На одной подложке изготавливают, как правило, одну схему.

#### *Материалы подложек ГИС*

**Подложки из ситалла.** Ситалл - продукт кристаллизации стекла с очень мелкими (0,01 – 1 мкм) и равномерно распределёнными по объёму кристалликами, сросшимися друг с другом или соединёнными прослойками остаточного стекла.

Получаемые в результате катализированной кристаллизации стекла при термообработке, ситаллы занимают промежуточное положение между обычными стёклами и керамикой. Ситаллы - плотные материалы от белого до коричневого цвета, отличающиеся повышенной механической прочностью по сравнению со стёклами (примерно в два раза), высокой химической стойкостью, а также сочетающие высокие диэлектрические и температурные свойства. Ситалл хорошо обрабатывается, полируется, обладает малой газопроницаемостью и выдерживает большие перепады температур. Большинство ситаллов представляют собой материалы, полученные на основе следующих композиций:



т.е. композиции в основном на основе стекла ( $\text{SiO}_2$ ) и окиси алюминия. Основные свойства ситаллов приведены в Таблице 4:

Таблица 4

Основные свойства ситаллов

Свойство	Марка						
	Ст-32-1	Ст-35-2	Ст-38-1	Ст-50-1	Ст-50-2	Ст-83	Ст-90
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,1	2,8	2,9	2,8	2,8	2,9	2,9
Удельное сопротивление $\rho \times 10^4$ , Ом·см	0,01	0,1	1	1	1	1	1
Электрическая прочность, кВ/мм	50	110	40	70	80	90	105
Теплопроводность, Вт/(м·К)	1,1	1,3	1,3	1,2	1,2	1,3	1,3
Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	10	5,5	7,3	8,5	6,4	6,6	6,8
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta \times 10^{-3}$	0,3	2	2	3	2	1	1
КТР $\times 10^{-6}$ , 1/°С	3,2	3,6	3,8	5,2	5,7	8	9
Предел прочности при изгибе $\sigma_{\text{и}} \times 10^8$ , Н/м <sup>2</sup>	2,5	1,7	1,8	2,5	1,7	2,5	2,6

Пластины ГИС изготавливают, кроме того, из керамических материалов на основе **окси бериллия (брокерита)** и **оксида алюминия (поликора)**. Пластины из поликора применяют в основном при изготовлении тонкоплёночных гибридных СВЧ ИМС. Поликор содержит до 99,7% оксида алюминия. В поликоре удачно сочетаются относительно высокая диэлектрическая проницаемость с малыми диэлектрическими потерями на СВЧ диапазоне.

Керамические подложки на основе окиси бериллия (брокерита) используют для мощных ГИС, т.к. они имеют теплопроводность на порядок выше, чем обычные

керамики на основе оксида алюминия. Однако, при обработке и получении бериллиевой керамики выделяется токсичная пыль, поэтому необходимо принимать специальные меры предосторожности, усложняющие производство и ограничивающие применение брокерита.

**Подложки из керамики на основе оксида алюминия** широко применяются при изготовлении различных микросхем, в основном толстоплёночных ГИС. Керамические подложки сравнительно дешёвы, имеют низкие потери, относительно высокую диэлектрическую проницаемость, малые температурные изменения электрофизических параметров, высокую теплопроводность, что позволяет изготавливать мощные схемы. К недостаткам керамических подложек следует отнести трудности, связанные с их полировкой - поверхность керамики после спекания всегда шероховатая, и вследствие этого шумы выше, чем у ситалла или поликора, кроме того, они имеют относительно низкую механическую прочность.

Наибольшее распространение получили две группы керамики, отличающиеся содержанием оксида алюминия. В первую группу, для которой содержание оксида алюминия составляет 98-99%, входят такие керамики, как А-995, ГМ, сапфирит и др. Керамики первой группы применяются преимущественно для подложек СВЧ микросхем. Во вторую группу, для которой содержание оксида алюминия составляет 93-96%, входят такие керамики, как 22ХС, ВВХ и др. Керамики второй группы применяются преимущественно для подложек толстоплёночных ИМС. Шероховатая поверхность керамики способствует повышению адгезии при вжигании проводящих, резистивных и диэлектрических паст толстоплёночных микросхем.

**Подложки из кварца** применяются для создания в микросхемах стабильных фильтров, генераторов и других элементов на основе пьезоэлектрических свойств.

**Металлические подложки** – титановые, алюминевые, покрытые слоем диэлектрика толщиной в несколько десятков мкм (40-60 мкм), или эмалированные стальные. Их применяют для изготовления тонкопленочных гибридных ИМС в случаях, когда требуется обеспечить хороший теплоотвод, высокую механическую прочность и жесткость конструкции. Металлические подложки так же, как и керамические, могут являться элементом корпуса ИМС.

**Гибкие подложки из полимерных материалов** используются для создания тонкопленочных гибридных ИМС, БИС и микросборок. Наибольшее распространение получили полиимидные пленки толщиной 40-50 мкм (до 100 мкм). Полиимид - класс термостойких полимеров, природа молекул которых определяет высокую прочность, химическую стойкость, тугоплавкость. Полиимидная пленка работоспособна при температуре 200°С в течение нескольких лет. Она легко подвергается травлению в концентрированных щелочах, что позволяет создавать в ней сквозные отверстия и получать электрические переходы при формировании многослойной металлической разводки, допускает 2-х стороннюю обработку, вакуумное нанесение пленочных материалов. Полиимидные подложки имеют малые толщину и массу, высокую ударопрочность и изгибистость. Недостатком является сравнительно высокое влагопоглощение (1-3% за 30 суток), поэтому полиимидная пленка нуждается в технологической сушке и защите.

**Подложки из сапфира** являются перспективными для применения в различных типах микросхем, как тонкопленочных гибридных, так и полупроводниковых, преимущественно ВЧ и СВЧ - диапазонов. Сапфир представляет собой монокристаллический оксид алюминия. Он обладает весьма малыми диэлектрическими потерями на СВЧ, высокой теплопроводностью, механической прочностью, устойчивостью к воздействию высокой температуры, влаги, излучений. Сапфир хорошо полируется до 14 класса чистоты.

Для увеличения плотности монтажа ИМС (ГИС) используют многослойные керамические пластины, представляющие собой чередующиеся слои керамического материала и металлизации определённой толщины и заданного рисунка. Большую роль при изготовлении ИМС играют комбинированные пластины, состоящие из изоляционной основы с созданными в ней участками полупроводника, которые могут располагаться как на поверхности, так и в специальных углублениях – карманах. Достоинство комбинированных пластин по сравнению с чисто полупроводниковыми – полная изоляция полупроводниковых участков друг от друга, а недостаток – значительные внутренние механические напряжения, возникающие в результате различия КТР изоляционного и полупроводникового материалов. Это особенно характерно для комбинированных пластин КНС (кремний на сапфире), так как различие КТР сапфира ( $8,4 \cdot 10^{-6}$ ,  $1/^\circ\text{C}$ ) и кремния ( $3,6 \cdot 10^{-6}$ ,  $1/^\circ\text{C}$ ) достаточно велико. Широкое применение сапфировых подложек ограничивается трудностями его изготовления и высокой стоимостью.

### ***Описание лабораторного макета***

Лабораторный макет состоит из набора кассет с образцами и лупы. В кассетах содержится набор образцов пластин и подложек для изучения в лаборатории.

**Внимание!** Пластины с образцами очень хрупки. После рассмотрения пластин сразу же ставьте их в кассету. При выполнении лабораторной работы недопустимо касаться поверхности пластин и подложек.

### ***Требования к отчету***

*Отчет должен содержать:*

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения классификационного характера о материалах пластин и подложек для изготовления ИМС.
4. Результаты выполнения заданий (п.п. 2,4 задания), сведенные в таблицу (пример таблицы \форма таблицы 5\ приведен в лабораторном задании в данной работе).
5. Выводы по работе.

### ***Лабораторное задание***

*Домашняя работа:*

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить начальную часть отчёта, содержащую титульный лист, цель работы и краткие теоретические сведения.
3. Подготовить форму таблицы (см. ниже) для работы с ней в лаборатории.

Форма Таблицы 5

<b>№ п/п</b>	<b>Материал пластин</b>	<b>Характерные признаки внешнего вида</b>	<b>Область преимущественного применения</b>	<b>Параметры и характеристики, определяющие область применения</b>

4. Подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

### *Работа в лаборатории:*

1. Изучить полупроводниковые пластины.
2. Изучить подложки ГИС.
3. Занести результаты в таблицу.

### ***Порядок выполнения работы***

1. Получить кассету Л1 с номером варианта.
2. Рассмотреть под увеличением образцы исходных подложек с номерами 1-4: 1-кремниевая пластина; 2 - германиевая пластина; 3 - арсенидгаллиевая пластина; 4 - фосфидгаллиевая пластина.
3. Определить характерные признаки внешнего вида образцов (цвет, матовая или зеркальная поверхность, наличие рисок), свойства и область применения. Результаты анализа занести в таблицу. Необходимые данные по параметрам пластин см. в табл. 1.
4. Рассмотреть под увеличением образцы подложек для ГИС с номерами 5-9: 5-ситалл (Ст39-1); 6-поликор (99,8%); 7-керамика 22ХС; 8-полиимид; 9-металлическая (титалан).
5. Запомните характерные признаки внешнего вида подложек. Укажите область применения подложек, параметры и характеристики подложек, определяющие их применение ( $\epsilon$ ,  $\text{tg}\sigma$ , ТКЛР,  $\lambda$ ). Необходимые данные по параметрам см. в табл. 3. Результаты анализа занести в таблицу.

### ***Контрольные вопросы***

1. Поясните следующие термины: полупроводниковая пластина, полупроводниковая микросхема, подложка ИС.
2. Дать определение тонкоплёночной и толстоплёночной микросхемы. Характерные признаки этих микросхем.
3. Дать определение гибридной микросхемы. Характерные признаки гибридных микросхем.
4. Каким требованиям должны удовлетворять подложки микросхем? Каково назначение различных типов подложек?
5. Дать определение интегральной микросхемы.
6. Что такое активные и пассивные элементы ИМС?
7. Какие требования предъявляют к полупроводниковым материалам?
8. Сравните кремний, германий и арсенид галлия как материалы для полупроводниковых ИМС.

## Лабораторная работа 8

### Очистка подложек

#### *Цель работы*

1. Изучить основные виды очистки подложек, типы используемых при этом сред и реактивов.
2. На основе эксперимента оценить возможности, преимущества и недостатки, а также необходимость методов очистки подложек при их использовании в технологии.
3. Изучить влияние различных типов загрязнений и режимов очистки на качество получаемой пленки.

#### *Теоретические сведения*

Электрофизические параметры и надежность полупроводниковых приборов и ИМС во многом зависят от степени совершенства поверхности пластин и отсутствия на них каких-либо загрязнений. Источниками загрязнения могут быть последствия предыдущих технологических операций обработки пластин или полуфабрикатов будущих полупроводниковых приборов, технологические газы и среды, сам оператор, различные абразивные порошки, пасты, фоторезист и т.д. Наиболее важна очистка подложек после их шлифовки и полировки. Состояние поверхности полупроводниковых пластин после их механической обработки можно охарактеризовать следующим образом: на поверхности полупроводника всегда остаются царапины, трещины, микронеровности. Толщина этого слоя, называемого механически нарушенным, может достигать 10-20 мкм. Кроме того, под действием давления и перемещения пластин по шлифовальному кругу в более глубоких слоях материала возникают остаточные напряжения. Они еще не вызывают образования трещин, но приводят к некоторому нарушению кристаллической решетки – сдвигу. Этот слой получил название физически нарушенного, и его толщина обычно составляет 5-10 мкм. Нарушенный приповерхностный слой, образующийся вследствие механической обработки, можно удалить лишь на операциях жидкостной и сухой (газовой) обработки пластин. Обработанная поверхность кремниевых пластин имеет на поверхности большое количество нескомпенсированных (ненасыщенных) связей, что определяет её высокие адсорбционные свойства и химическую активность, в особенности по отношению к различным загрязнениям. Последнее определяет необходимость периодической (пооперационной) очистки поверхности полупроводниковых пластин и подложек. Так как идеально чистой поверхности пластин не бывает, вводится понятие технологически чистой, т.е. поверхности, концентрация примесей на которой не препятствует воспроизводимому получению заданных значений параметров приборов и ИМС и их стабильности. Обычно допустимая концентрация примесей не должна превышать  $10^{-8}$  г/см<sup>2</sup>.

Удаляют загрязнения жидкостными и сухими методами, которые сами по себе подразделяются на физические и химические.

*Жидкостная обработка* - это обезжиривание и травление пластин, а также обязательная их промывка после каждой операции в воде.

*Обезжиривание в органических растворителях* - основано на удалении с поверхностей молекул жиров. При этом молекулы не разрушаются, а распределяются по всему объему ванны, заполненной четыреххлористым углеродом, бензолом, толуолом, изопропиловым спиртом. Такая очистка высокоэффективна, но многостадийна, требует большого расхода растворителей, дорогостояща и в большинстве случаев токсична. Промывка предназначена для удаления остатков загрязнений, реагентов и продуктов реакций в специально очищенной

(дистиллированной, бидистиллированной и деионизованной) воде.

*Обезжиривание в активных средах* - основано на разрушении молекул жира растворителем, обычно горячим (75-80 °С) перекисно-аммиачным раствором ( $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ ). Выделяющийся в результате разложения перекиси водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) атомарный кислород обладает высокой окислительной способностью по отношению к органическим (жиры, масла, силиконы) и неорганическим загрязнениям. Очистку поверхности пластин от растительных и животных жиров выполняют в мыльных растворах. В промышленности широкое распространение получила отмывка в ваннах и спреевая очистка в автоматизированных процессорах. В качестве рабочих жидкостей используют смеси  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{NH}_4\text{OH}$ ;  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HCl}$ ;  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ . Кислотные автоматизированные процессоры весьма эффективны, используются как на этапах финишной отмывки для большинства технологических операций, так и для целей межоперационных отмывок. Однако, кислотная отмывка практически не применима перед диффузионными процессами и процессами ионной имплантации. В этом случае используют специальное оборудование освежения поверхности пластин. Отмывочной средой в данном случае является сверхчистая деионизованная горячая вода с озоном, получаемым в специальных генераторах озона. Горячая деионизованная вода по своему отмывочному действию по отношению к подложкам сравнима с горячей  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – поэтому на производстве горячая (нагретая до 80 °С) деионизованная вода часто является заменой серной кислоты. При этом достигается экономия химикатов, значительное энергосбережение и технологический процесс идет быстрее.

*Химическое травление* основано на растворении поверхности пластин соответствующими жидкими химическими реактивами (щелочами, кислотами и их солями) и состоит из нескольких этапов: диффузии реагента к поверхности и адсорбции его; поверхностных химических реакций; десорбции продуктов реакции и диффузии их от поверхности. Травители, при обработке в которых самыми медленными стадиями, определяющими скорость процесса, являются диффузионные, называют *полирующими*. Обработка в таких травителях мало зависит от изменения температуры, но существенно от их вязкости и перемешивания. Выступы на поверхности пластин травятся быстрее впадин, при этом сглаживаются шероховатости и выравнивается микрорельеф. Германий и кремний, например, обрабатывают в полирующих травителях, состоящих из смеси азотной ( $\text{HNO}_3$ ) и плавиковой ( $\text{HF}$ ) кислот. Травители, при обработке в которых самой медленной стадией является химическая реакция, называют *селективными* (например,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ). При этом скорость травления зависит от температуры, а также структуры и кристаллографической ориентации поверхности пластин. Селективные травители, значительно отличающиеся скоростями травления по разным кристаллографическим направлениям, называют *анизотропными*.

*Электрохимическое травление* - является разновидностью обработки в активных средах и основано на химических превращениях, происходящих при электролизе. Основой процесса являются реакции анодного окисления (растворения) и катодного восстановления. Травление производят в растворах, содержащих  $\text{HF}$ , при возрастающей плотности тока. Такое травление называют также *электрополировкой*.

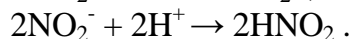
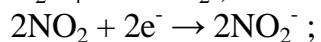
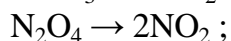
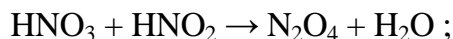
*Химическое травление и полировка германия и кремния*

С точки зрения электрохимической теории поверхность полупроводниковой пластины неоднородна и между отдельными микроучастками протекают электрохимические реакции. Другими словами, травление германия и кремния в кислотных травителях представляет собой электрохимический процесс.

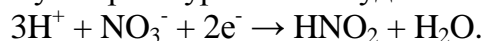
Для катодной реакции восстановления  $\text{HNO}_3$  может быть представлена следующая схема:



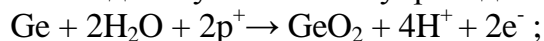




Суммарное уравнение будет выглядеть так:



На анодных участках полупроводника осуществляются следующие процессы:



$p^+$  - эквивалент отсутствия электрона в валентной зоне полупроводника (дырка);

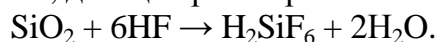
$n^-$  - электрон валентной зоны полупроводника

$x$  - число, не превышающее трех, участвующее в определении стехиометрического коэффициента процесса в зависимости от глубины восстановления  $\text{HNO}_3$  на катодных участках полупроводника при процессе саморастворения полупроводника (термин саморастворение применён лишь на том основании, что полупроводник выступает в роли и катодных участков и в роли анодных).

При невысоких концентрациях азотной кислоты скорость растворения полупроводника лимитируется катодным процессом. При этом образуется  $\text{HNO}_2$ , которая сама является реагентом, поэтому скорость растворения должна увеличиваться со временем, т.е. реакция будет автокаталитическая. Перемешивание травителя приводит к уменьшению концентрации  $\text{HNO}_2$  вблизи катодной области, а следовательно, будет приводить к повышению скорости саморастворения (за счет сдвига равновесия в сторону образования  $\text{HNO}_2$ , а следовательно, захвата электрона при катодной области из валентной зоны полупроводника, то есть гибели дырок в анодных процессах, сопровождающихся образованием диоксида кремния (германия), то есть их растворением – саморастворением).

Если в травителе содержится  $\text{HNO}_3$  высокой концентрации, то процесс саморастворения замедляется (проявляется фактор недостатка  $\text{HNO}_2$ ) и скорость всего процесса ограничивается уже не катодной, а анодной реакцией.

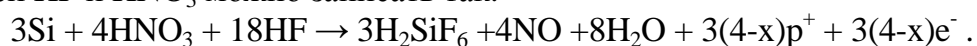
Добавление в травящий раствор  $\text{HF}$  приводит к ускорению растворения полупроводника, так как она разрушает пассивирующую пленку диоксида на полупроводнике. На примере кремния это можно проиллюстрировать следующей реакцией, дающей растворимый в воде фторид:



Согласно электрохимической теории саморастворения, основная функция окислителя состоит не в окислении поверхности полупроводника, а в доставке восстанавливающихся молекул и ионов к катодным участкам полупроводниковой пластины. Как уже было сказано ранее, восстановление окислителей происходит с захватом электронов из валентной зоны полупроводника, что равносильно образованию новых дырок непосредственно на поверхности полупроводниковой пластины:



Таким образом, полное уравнение реакции саморастворения кремния, например, в смеси  $\text{HF}$  и  $\text{HNO}_3$  можно записать так:

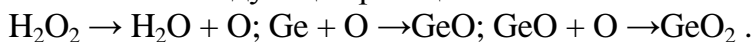


Нужно иметь в виду, что восстановление  $\text{HNO}_3$  на катодных участках может происходить до  $\text{NO}$ . При этом в результате восстановления одной молекулы кислоты на поверхности  $\text{Si}$  образуются уже три дырки, а не две, как в случае образования  $\text{HNO}_2$ . Скорость растворения полупроводника при этом увеличивается.

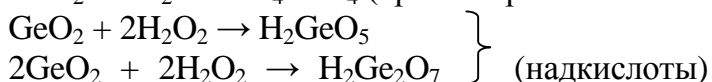
*Травление германия в перекиси водорода*

Согласно химической теории процесс растворения германия в  $\text{H}_2\text{O}_2$  состоит из

двух этапов – окисление Ge до  $\text{GeO}_2$  и растворения полученной двуокиси в воде. При этом имеют место следующие реакции:

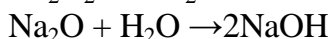
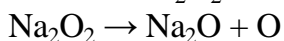
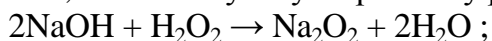


Поскольку скорость последующего растворения в воде  $\text{GeO}_2$  больше, чем  $\text{GeO}$ , конечным продуктом реакции окисления является  $\text{GeO}_2$ . В зависимости от концентрации  $\text{H}_2\text{O}_2$  скорость растворения Ge проходит через максимум и достигает своего максимального значения примерно при 4%  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Сначала скорость растворения германия определяется процессом его окисления, увеличивающегося с увеличением числа атомов кислорода. Дальнейшее снижение скорости растворения Ge связано с уменьшением скорости реакции растворения продуктов окисления. Второй этап процесса сопровождается реакциями:



Травление германия в  $\text{H}_2\text{O}_2$  имеет то преимущество, что в процессе разложения перекиси водорода образуется вода, а следовательно, не возникает дополнительных загрязнений ни растворителя, ни поверхности пластин. Нужно иметь в виду, что  $\text{H}_2\text{O}_2$  является селективным травителем, то есть скорость растворения германия в плоскости (111) меньше, чем в плоскостях (110) и (100).

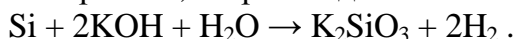
Для увеличения скорости травления в раствор можно добавлять щелочи. Они, во-первых, способствуют ускоренному разложению  $\text{H}_2\text{O}_2$ :



и, во-вторых, образуют с  $\text{GeO}_2$  легко растворимые комплексы. Поскольку выше приведенные реакции сопровождаются выделением тепла, становится возможным поддержание автотермического процесса травления.

#### *Травление кремния в щелочах*

Перекись водорода совершенно не может быть использована для травления кремния, так как образуется пленка  $\text{SiO}_2$ , которая не растворяется в воде и тормозит дальнейший процесс. Поэтому в технологии используется щелочное травление – 30-42% раствор KOH, нагретый до кипения:



Типичный щелочной травитель представляет собой 30% раствор NaOH или KOH, температура 50-100 °C, время 1-5 мин.

#### *Общие закономерности травления германия и кремния в кислотных травителях.*

Скорость растворения германия и кремния в любом травительном растворе можно определить из соотношения:

$$V = \frac{P_0 - P}{S \cdot t} \text{ г/см}^2 \cdot \text{с},$$

где  $P_0$  – вес пластин до травления;

$P$  – вес пластин после травления;

$S$  – эффективная поверхность пластин;

$t$  – время травления.

В ряде случаев скорость травления удобнее оценивать по изменению толщины пластины и тогда эта величина будет иметь размерность мкм/с. Следует отметить, что скорость травления не одинакова во времени – в начале процесса она высока, так как нарушенный поверхностный слой материала травится быстрее, а затем несколько замедляется и становится постоянной величиной. Любой травильный раствор для

германия или кремния должен содержать в своем составе в качестве обязательных компонентов какой-либо сильный окислитель, переводящий полупроводник в окисленное состояние и агент - комплексообразователь, переводящий окисел в раствор. В качестве окислителя чаще всего используется азотная кислота, а также йод, бром и некоторые соли, например, NaJ, FeCl<sub>3</sub>. Наиболее подходящими комплексообразователями являются фтористоводородная кислота (HF) и щелочи – NaOH, KOH.

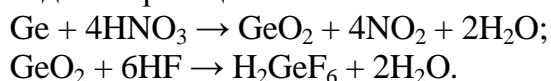
Кроме этих обязательных компонентов, в травильном растворе часто бывают необходимы и другие составляющие. В частности, для ускорения процесса вводятся J<sub>2</sub> и Br<sub>2</sub>, для регулирования скорости травления используются замедлители реакции – вода, уксусная кислота – CH<sub>3</sub>COOH. Для выявления определенных кристаллографических плоскостей в травитель добавляют агенты, дающие селективное травление – AgNO<sub>3</sub>, HgNO<sub>3</sub> и др.

Таким образом, состав травителя для германия и кремния в общем случае должен состоять из следующих компонентов:

- окислителя
- комплексообразователя
- ускорителя
- стабилизатора реакции (замедлителя).

В зависимости от условий травления и требований к качеству поверхности материала выбирают то или иное сочетание компонентов в травильном растворе.

Скорость травления зависит от кристаллографической ориентации пластины, состава травителя и температуры. В качестве примера влияния состава на рисунке 1 приведено изменение скорости травления кремния от концентрации в растворе фтористоводородной кислоты. Видно, что повышать ее содержание выше 70% нецелесообразно. Максимальная скорость травления наблюдается при соотношении HNO<sub>3</sub>:HF = 1:4,5 (в мольных долях). Что касается температуры, то с ее увеличением скорость травления возрастает линейно (в интервале температур от 5 до 60 °C). Наиболее часто для целей химической обработки германия используется травитель из смеси HNO<sub>3</sub>, HF и CH<sub>3</sub>COOH. Процесс сопровождается реакциями:



Скорость травления в этой смеси не постоянна – имеет место индукционный период, когда скорость процесса очень маленькая. Этот период можно сократить, если добавить в травитель небольшое количество таких катализаторов, как N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> или NaNO<sub>2</sub>.

Часто в качестве полирующих травителей для германия используются растворы, содержащие HF и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. В качестве замедлителя реакции при этом используется вода, однако нужно иметь в виду, что при большом содержании воды травитель приобретает селективные свойства.

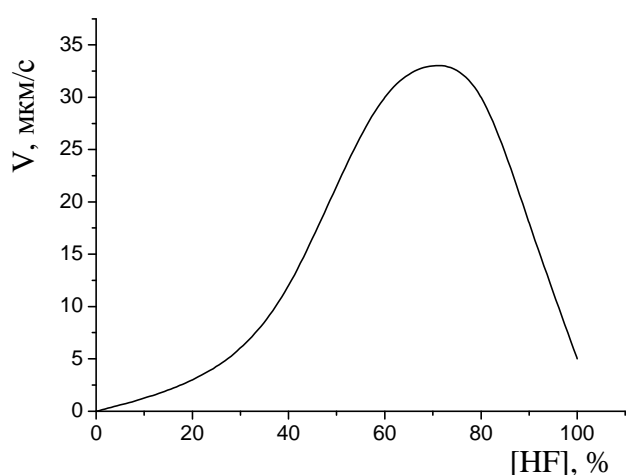
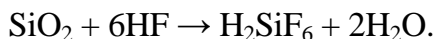


Рис.1. Зависимость скорости травления кремния от соотношения HNO<sub>3</sub> и HF

Кислотное травление кремния ведется в травителях аналогичного состава, как в случае германия, и описывается реакциями:





Максимальная скорость травления наблюдается, когда отношение HF:HNO<sub>3</sub> в растворе в мольных долях равняется 1:4. Для получения воспроизводимых результатов необходимо интенсивное перемешивание травителя и поддержание постоянной температуры.

*Примеры промышленных травителей*

Существует много рецептов травителей, пригодных для различных целей. В таблице 1 приведены несколько широко применяемых рецептов для кремния:

Таблица 1

Промышленные составы травителей

№ п/п	Состав травителя	Характеристика травителя
1.	HNO <sub>3</sub> :HF = 3:1	Полирующий травитель. Температура процесса – не более 30-40 °С.
2.	HNO <sub>3</sub> :HF:CH <sub>3</sub> COOH = 3:1:9	Применяется для травления по любым кристаллографическим плоскостям. Температура процесса не более 25 °С.
3.	HNO <sub>3</sub> :HF:CH <sub>3</sub> COOH = 5:3:3	Используется для медленного химического полирования Si, а также для выявления дислокаций и p-n-переходов.
4.	20 мл HNO <sub>3</sub> + 30 мл HF + 10 мл H <sub>2</sub> O + 1 г Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Для быстрой оценки плотности дислокаций по ямкам травления на всех кристаллографических плоскостях.
5.	50 мл разбавленного (до 10%) раствора Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> + 2-3 капли HF	Для выявления границы p-n-перехода в кристалле. Медь осаждается на участок Si с меньшим удельным сопротивлением.
6.	15 г CrO <sub>3</sub> + 35 мл H <sub>2</sub> O + 15 мл HF (49%)	Для выявления дислокаций.

Примечание. Для приготовления травильных смесей используются кислоты: азотная 65-70%, плавиковая – 40-49%, уксусная – ледяная.

*Сухая обработка* — это отжиг (термообработка), ионное, газовое и плазмохимическое травление.

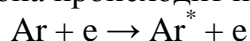
*При термообработке* удаляют при высоких температурах адсорбированные поверхностью пластин загрязнения их разложением и испарением. Отжиг проводят в термических установках в среде инертного газа или в вакууме непосредственно перед операциями формирования полупроводниковых или пленочных структур. Термоотжиг также эффективно используется для целей устранения последствий ионной имплантации, однако следует помнить, что это высокотемпературный процесс, который в принципе может повлиять на качество сформированных полупроводниковых структур в кристалле, особенно при переходе на субмикронные размеры формируемых элементов микросхем.

*Ионное травление* - процесс удаления слоев материала вместе с загрязнениями бомбардировкой его поверхности потоком ионов инертных газов высокой энергии. Так, при травлении кремния энергия ионов достигает 1-10 кэВ. При бомбардировке поверхности пластин ионы передают атомам обрабатываемого материала дополнительные энергию и импульс. Если передаваемая атомам энергия превышает энергию их химических связей, а сообщаемые импульсы направлены наружу от поверхности, происходит смещение атомов, их отрыв от поверхности и распыление.

Эффективность удаления материала ионной бомбардировкой - коэффициент распыления  $S$  - определяется отношением количества испаряемых поверхностью атомов  $n_a$  к количеству бомбардирующих ионов  $n_i$ , т.е.  $S = n_a/n_i$ . Этот параметр является одним из основных для определения скорости травления, которая, в свою очередь, зависит от массы обрабатываемого материала, состояния его поверхности, энергии и угла падения ионов, а также давления рабочего газа в камере.

В зависимости от способа генерации ионов и конструкции установок различают ионно-плазменное и ионно-лучевое травление.

При ионно-плазменном травлении держатель с пластинами, находящийся под отрицательным потенциалом, помещают в плазму газового разряда. Обычно в качестве рабочего газа используют аргон, он же является плазмообразующим газом и источником ионов. Ионизация аргона происходит при электронном ударе:



Положительно заряженные ионы аргона устремляются к отрицательно заряженному держателю пластин, ускоряются электрическим полем и бомбардируют поверхность, распыляя и, соответственно, очищая ее. В зависимости от напряжения на электродах, плотности ионного тока, давления инертного газа и продолжительности процесса скорость травления кремния, диэлектриков и металлов соответственно равна 0,2; 0,1 и 0,3 мкм/мин. Процесс безинерционен.

При ионно-лучевом травлении пластины помещают на специальные мишени, расположенные вне зоны плазмы, и бомбардируют ионами, создаваемыми автономным газоразрядным источником (источником ионов). Поток ионов фокусируется и управляется электрическим и магнитным полями. Положительные заряды, накапливаемые на обрабатываемой поверхности, компенсируются инжекцией электронов.

Ионное травление позволяет не только очищать поверхность любых подложек (полупроводниковых, диэлектрических и др.) от различных загрязнений, но и оказывается эффективным при их прецизионной локальной обработке.

При газовом травлении происходит химическое взаимодействие материала пластин с газообразными веществами и образующиеся при этом соединения улетучиваются. В качестве травителей используют смеси водорода или гелия с галогенами (фтором, хлором, бромом), галогеноводородами HBr, HCl, сероводородом H<sub>2</sub>S и др. Соотношение этих веществ в водороде или гелии составляет от десятых долей до десятков процентов. Температура обработки 800-1300 °С. Газовое травление позволяет окончательно удалить нарушенный слой и обеспечивает получение более чистой поверхности, чем при жидкостной обработке. Однако необходимость использования особо чистых газов и высокие температуры процесса ограничивают его применение.

При плазмохимическом травлении молекулы активного газа распадаются в разряде на реакционно-способные частицы (ионы, свободные радикалы) и химически взаимодействуют с поверхностью подложек. Скорость травления зависит в основном от температуры и газового состава плазмы. Введение в плазму инертного газа (аргона) или химически активного газа (например, кислорода, хлора) изменяют скорость травления. Увеличение концентрации химически активного газа влияет на суммарную скорость травления через образование химически активных радикалов. Добавки тяжелого инертного газа к плазмообразующему газу приводят к образованию в разряде тяжелых ионов и интенсифицируют химическое взаимодействие материала подложки с химически активными компонентами плазмы через очистку подложек от продуктов их взаимодействия. Такое сочетание ионного и плазмохимического травления называют ионно-химическим (реактивным) травлением.

При изготовлении полупроводниковых приборов и ИМС, как правило, проводят комплексную очистку пластин, при которой удаляют практически все загрязнения. Так, обработка пластин кремния перед термическим окислением как правило состоит из следующих операций:

1. Обезжиривания в перекисно-аммиачном растворе при 75-80 °С и промывки в проточной деионизованной воде.
2. Обработки в концентрированной азотной кислоте при 90-100 °С и промывки в проточной деионизованной воде.
3. Гидродинамической обработки беличьими кистями в струе деионизованной воды.
4. Травления в растворе фтористоводородной кислоты и промывки в деионизованной проточной воде.
5. Ультразвуковой обработки в нескольких порциях перекисно-аммиачного раствора и промывки в проточной деионизованной воде.
6. Сушки в центрифуге.

При изготовлении полупроводниковых приборов и ИМС в большинстве случаев применяют жидкостную обработку. Сухую очистку проводят на специальных установках перед наиболее ответственными операциями, например, такой как травление при литографической обработке, а также непосредственно перед напылением пленок и эпитаксией.

### ***Описание лабораторного макета и оборудования***

В зависимости от вида выполняемого задания в рамках данной лабораторной работы комплектация лабораторного оборудования может незначительно изменяться, однако в любом случае студенту выдается:

1. Комплект химической посуды, состоящий:
  - из керамической чашечки (ванночки) для травления образцов;
  - пластикового пинцета;
  - стеклянной чашечки (стакана) для промывки образцов после обработки;
  - стеклянной палочки для перемешивания жидкостей.
2. Набор подложек для нанесения на них тонких пленок методами вакуумного испарения или магнетронного распыления (описание соответствующих установок смотри в работе № 9).
3. Комплект стандартных травильных растворов (травильные растворы готовятся заранее штатным лаборантом и хранятся в лаборатории под тягой).
4. Для оценки степени очистки подложек перед нанесением на них тонкой металлической пленки (меди или алюминия) и анализа совершенства их адгезионных характеристик может использоваться промышленная ультразвуковая установка (описание ее смотри в работе №9).
5. Стандартный набор лабораторных отмывочных средств: четыреххлористый углерод, ацетон, бензол, толуол, изопропиловый спирт, а также поливиниловый спирт (хранятся под тягой в лаборатории).
6. Аналитические весы.
7. Секундомер (часы с секундной стрелкой).
8. Микроскоп с большим увеличением типа МИМ-3, МИМ-8.
9. Ветошь для протирки или фильтровальная бумага

### ***Требования к отчету***

*Отчет должен содержать:*

1. Титульный лист.

2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения согласно предложенного варианта выполнения работы (теоретические сведения не должны превышать 3,4 листов печатного текста, не допускается копирование всего материала теоретического введения в отчет).
4. Основные результаты, сведенные в таблицы.
5. Выводы по работе.

### Лабораторное задание

#### Домашняя работа:

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить необходимые экземпляры форм таблиц для занесения результатов лабораторных испытаний:

Форма таблицы 1

Результаты лабораторных измерений

№ п/п	Время $\tau$ , с	Текущая масса образца $P_i$ , г	Убыль массы образца $\Delta P_i$ , г	
1	0		-	
2	30			
3	60			
4	-	-	$\Delta P_{(обр)}$ , Г	(Сумма по $\Delta P_i$ )

Форма таблицы 2

Результаты лабораторных измерений

Номер участка пластины	Количество дислокаций на площади $S$ , шт	Среднее количество дислокаций для «5» замеров, $n$ , шт	Площадь измерений, $S$ , $\text{см}^2$
1			
2			
3			
4			
5			

Форма таблицы 3

Результаты лабораторных испытаний

Номер подложки и ее тип	Тип загрязнения (или чистая тестовая)	Результаты испытаний на истирание	Ультразвук (время обработки до разрушения пленки)
<i>Пример: №1; стеклянная</i>	<i>Пример: тестовая</i>	<i>Пример: качество пленки визуально не изменилось</i>	<i>Пример: качество пленки не изменилось после 5 мин. обработки</i>
и т.д.			

3. Изучить теоретические сведения.

4. Подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

*Работа в лаборатории:*

Конкретное задание в данной работе форматируется преподавателем, который в праве потребовать выполнения всего объема работы или ее отдельных разделов, включая исследование тех или иных процессов либо объектов. Практически возможно проведение следующих заданий:

1. Определение глубины нарушенного слоя полупроводниковой пластины.
2. Выявление кристаллографической ориентации пластины и количественное определение микродефектов структуры.
3. Исследование влияния режима процесса на скорость травления и качества поверхности.
4. Изучение влияния типов загрязнения подложки на адгезионные характеристики наносимых на них тонких металлических пленок.

***Порядок выполнения работы***

*1. Определение глубины нарушенного слоя полупроводниковой пластины.*

Толщину нарушенного слоя монокристалла можно оценить по изменению скорости травления при поэтапном растворении поверхностного слоя материала. Как было сказано ранее, дефектные кристаллы травятся быстрее, чем совершенный монокристалл, поэтому, определяя скорость травления при послойном удалении материала подложки, можно зафиксировать момент, когда она станет постоянной величиной. Этот факт будет указывать на полное снятие нарушенного слоя. Скорость травления проще всего определять по уменьшению массы образца, поэтому следует выполнять по следующей схеме:

- 1.1. Очистить поверхность образца последовательно в жирном растворителе (бензол, толуол, орто-ксилол или т.п.), а затем в ацетоне, используя при этом протирочную ветошь (вату) и пинцет, не допуская касаний поверхности пластины руками. Чистые образцы переносить на фильтровальной бумаге.
- 1.2. Высушить образец на воздухе или в сушильном шкафу до полного высыхания образца. Поверхность чистой сухой пластины должна быть без разводов и следов от остатков растворителей (в дальнейшем травящих растворов).
- 1.3. Взвесить образец на аналитических весах. Результат замера занести в таблицу формы 1.
- 1.4. Не касаясь образца руками перенести образец полупроводниковой пластины в травитель (по заданию преподавателя) и обрабатывать в течение 30 секунд.
- 1.5. По истечении указанного времени промыть образец в дистиллированной воде и высушить в сушильном шкафу при температуре 80-90 °С.
- 1.6. Повторять пункты 1.3 – 1.5 до тех пор, пока убыль массы образца не станет постоянной. В зависимости от типа выбранного травителя, предыстории обработки образца и температуры травителя - временной интервал обработки пластины в травителе может быть увеличен до нескольких минут (подбирается экспериментально). По результатам опыта строится график зависимости количества удаленного материала образца от времени, то есть кинетическая кривая травления образца (рис.2).



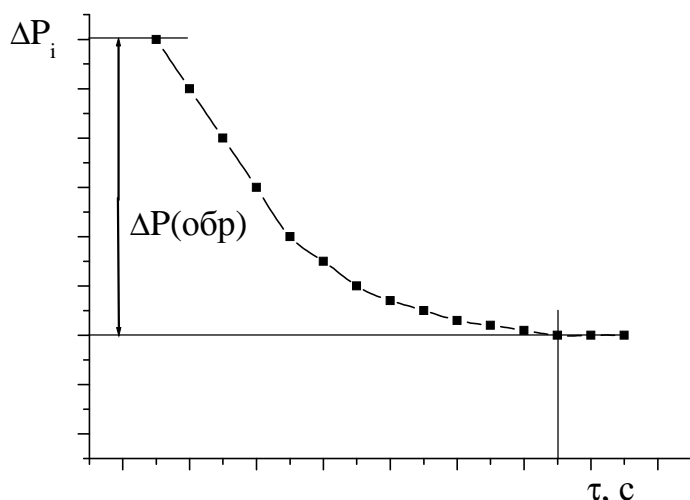


Рис.2. Кинетическая кривая травления

1.7. По графику находится точка перехода кривой на горизонтальный участок и далее рассчитывается глубина нарушенного слоя по формуле, которая учитывает геометрическую поверхность пластины:

$$d = \frac{\Delta P_{(обр)}}{Sr} \cdot 10^4 \text{ мкм},$$

где  $\Delta P_{(обр)}$  – общее количество удаленного материала до точки перегиба, г;

$S$  – геометрическая поверхность образца,  $\text{см}^2$ ;

$\rho$  – плотность материала образца,  $\text{г/см}^3$  (Si – 5,326; Ge – 2,322).

## 2. Выявление кристаллографической ориентации пластины и количественное определение микродефектов структуры.

При выращивании монокристаллов полупроводникового материала всегда стараются задать определенное кристаллографическое направление его роста, знание которого необходимо для более грамотного и целесообразного использования этого материала в технологии изготовления приборов. Известны три метода определения кристаллографической ориентации слитков и пластин – рентгенографический, световых фигур и фигур травления. Технически и технологически более прост последний, в связи с этим именно он реализуется в лаборатории.

Идея метода состоит в том, что при травлении полированной поверхности полупроводника материал растворяется быстрее в тех местах, где имеются дефекты структуры, чаще всего дислокации. В результате на этой поверхности появляются так называемые фигуры (или ямки) травления, форма которых определяется кристаллографической ориентацией пластины. Условное обозначение кристаллографических плоскостей и направлений в кристалле с кубической решеткой смотри на рисунке 3.

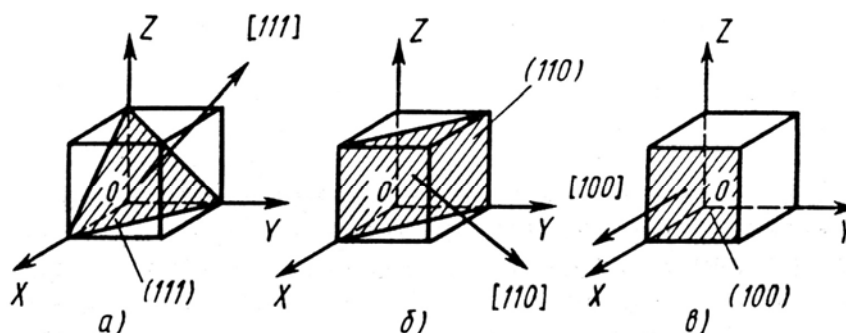


Рис.3. Условное обозначение кристаллографических плоскостей и направлений в кристалле

Кристаллические тела анизотропны, то есть их свойства зависят от направлений воздействия и измерения. В этом случае межатомные расстояния определяют характер и значение энергетического взаимодействия атомов, прочность их сцепления, а следовательно, способность противостоять (или способствовать)

электрическому, оптическому, химическому и другим внешним воздействиям. В связи с этим важным оказывается и сама ориентация пластин, и среднее число дефектов в ней, приходящихся на единицу поверхности.

Наиболее часто монокристаллы кремния ориентированы в плоскости (111) – дислокационные ямки травления в этом случае имеют вид трехгранной пирамиды с равносторонним основанием, вершина которой уходит в глубину пластины. При просмотре такой протравленной поверхности в поле зрения микроскопа с большим увеличением в отраженном свете ямки травления выглядят как темные треугольники. Для ориентации (110) и (100) соответственно фигуры травления будут выглядеть как шестигранник и квадрат.

При выполнении работы необходимо придерживаться следующей последовательности действий:

- 2.1. Обезжирить выданные преподавателем образцы по методике предыдущего задания данной лабораторной работы.
- 2.2. Заполнить керамическую чашечку (ванночку) травителем № 6 (см. таблицу 6).
- 2.3. Осторожно (пинцетом не касаясь поверхности пластины руками) перенести последовательно образцы в травильный раствор при комнатной температуре и проводить процесс травления в течение 15 минут.
- 2.4. По истечении 15 минут максимально быстро перенести образцы в стеклянный стакан с дистиллированной водой для тщательной промывки от остатков травителя. В противном случае поверхность образца быстро окисляется.
- 2.5. Высушить протравленные образцы фильтровальной бумагой или в сушильном шкафу на фильтровальной бумаге.
- 2.6. Пинцетом перенести высушенные образцы в поле зрения микроскопа с большим увеличением и внимательно рассмотреть из поверхности. Эскиз наблюдаемого в поле зрения микроскопа рисунка зарисовать в лабораторном журнале.
- 2.7. В случае невозможности идентификации четких фигур травления повторить п.п. 2.3-2.6.
- 2.8. При четком наблюдении в поле зрения микроскопа фигур травления (дислокаций) произвести подсчет их количества. Для этого протравленную поверхность образца просматривают в двух взаимно перпендикулярных направлениях на пяти участках пластины, используя окуляр с координатной сеткой. Результаты измерений занести в таблицу формы 2.
- 2.9. Рассчитать плотность дислокаций, используя данные таблицы 8 по формуле:

$$N = \frac{n}{S} \text{ см}^{-2},$$

где  $n$  – среднее арифметическое из количества ямок травления на пяти участках протравленной пластины;

$S$  – площадь поля зрения микроскопа, в пределах которой производился подсчет количества ямок травления.

### 3. Исследование влияния режима процесса на скорость травления и качества поверхности.

Под режимом травления следует понимать состав травителя, температуру процесса и его продолжительность. Поэтому преподаватель по своему усмотрению может по разному сформулировать задачу:

- исследовать зависимость скорости травления образца от состава травителя

(из набора стандартных) при постоянной температуре;

- исследовать влияние температуры процесса на скорость травления образцов при использовании одного травителя;

- изучить влияние кристаллографической ориентации пластин на скорость ее травления в конкретном травителе (травителях) при одной и той же температуре.

Скорость травления следует определять весовым методом по убыли веса

образца, согласно выражению:  $V = \frac{P_0 - P}{S \cdot t} \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$ ,

где  $P_0$  – вес пластины до травления, г;

$P$  – вес пластины после травления, г;

$S$  – эффективная поверхность пластины, см<sup>2</sup>;

$t$  – время травления, с.

3.1. При выполнении работы следует придерживаться методики и правил выполнения эксперимента, описанных в разделе 1 данной лабораторной работы (см. п.п. 1.5-1.6), стравливая с образца нарушенный слой.

3.2. Повторить процесс травления, установив при этом время примерно в 3-5 раз превышающее время стравливания нарушенного слоя. Если примерное время удаления нарушенного слоя известно, то можно определить усредненную скорость травления образца, установив время травления заведомо большее, чем время стравливания нарушенного слоя пластины.

3.3. По приведенной выше формуле рассчитывается скорость травления на основе весовых измерений.

3.4. Изменить режим травления по заданию преподавателя и повторить пункты 3.1-3.3 данной лабораторной работы.

Примечание: для оценки скорости в расчет необходимо брать геометрическую поверхность образца. При использовании средств измерения температуры следует помнить, что многие травильные составы разъедают стекло (после измерений термометр необходимо споласкивать дистиллированной водой). В каждом случае по окончании процесса травления пластина (образец) промывается дистиллированной водой, высушивается и только после этого подвергается взвешиванию.

#### 4. *Изучение влияния типов загрязнения подложки на адгезионные характеристики наносимых на них тонких металлических пленок.*

Материал подложек должен обеспечивать необходимую механическую прочность и адгезию, как правило, не должен взаимодействовать с материалом наносимых пленок, иметь высокое удельное сопротивление, высокую теплопроводность и термостойкость. Решающим фактором при использовании материала в качестве подложек будущих микросхем является чистота его поверхности. Стоит отметить, что источником загрязнения поверхности подложки могут быть и сами реактивы, и лабораторная посуда (технологическое оборудование), и сам человек. В связи с этим используемые реактивы и посуда должны быть чистыми, отмывочная вода должна быть как минимум дистиллированная, непосредственный контакт человека с подложкой (например, руками) должен быть исключен.

В работе в качестве простого метода контроля чистоты поверхности стекла может использоваться метод «фигур запотевания». В этом методе экспериментатор должен подержать очищенную подложку над поверхностью кипящей воды или слегка подышать на нее. Влага конденсируется на поверхности и образуются так называемые «фигуры запотевания» или «фигуры дыхания». Если подложка недостаточно очищена, то образуется матовая поверхность, состоящая из небольших капелек воды. Такой тип водяной пленки на стекле называется «серой фигурой запотевания (дыхания)». Если

поверхность подложки стекла очищена хорошо, то вода конденсируется в виде оптически однородного слоя, представляющего «черную зеркальную водяную пленку». Такой тип водяной пленки называется «черной фигурой запотевания (дыхания)». Стеклоподобная поверхность с «черными фигурами запотевания» имеет очень высокий коэффициент сухого трения. Этот факт также может быть использован при контроле качества подложки. Металлические слои, осажденные на хорошо очищенную подложку, обладают очень высокой адгезией и не могут быть удалены даже при помощи интенсивного стирания или при обработке подложек в ультразвуке. Однако, несмотря на достаточную чувствительность методов, основанных на смачивании поверхности, интерпретация наблюдаемых явлений достаточна субъективна. Так при увеличении шероховатости поверхности достаточно хорошие формы смачивания распознаются труднее. Или же можно получить ложный результат - сплошную пленку воды на поверхности, если она окажется загрязнена остатками поверхностно-активных веществ (ПАВ), являющимися средствами отмычки от жирных загрязнений. Устранить «ложную» смачиваемость можно погружением подложек в слабый раствор кислоты, при этом остатки моющих веществ переходят в гидрофобные, жирные кислоты, разрывающие водную пленку. Тем не менее, для количественной оценки смачиваемости поверхности (ее чистоты) широко применяется метод измерения угла смачивания. В этом методе краевой угол смачивания определяется между касательной к поверхности капли жидкости в точке соприкосновения трех фаз (твердой, жидкой и газообразной) и поверхностью твердого тела, измеренный внутри жидкой фазы. На полностью смачиваемой поверхности угол равен почти  $0^{\circ}$ . На смачивающихся поверхностях капли имеют полусферическую форму с углом смачивания больше нуля градусов и в предельном случае приближающимся в  $180^{\circ}$  (рисунок 4).

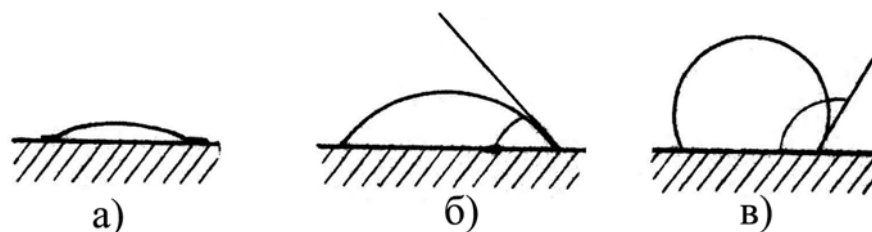


Рис.4. Углы смачивания: а - практически полное растекание; б - хорошее растекание; в - плохое растекание.

В лаборатории реализуется лазерный метод определения угла смачивания (схема установки показана на рисунке 5).

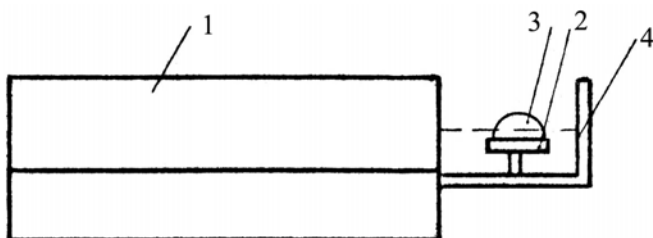
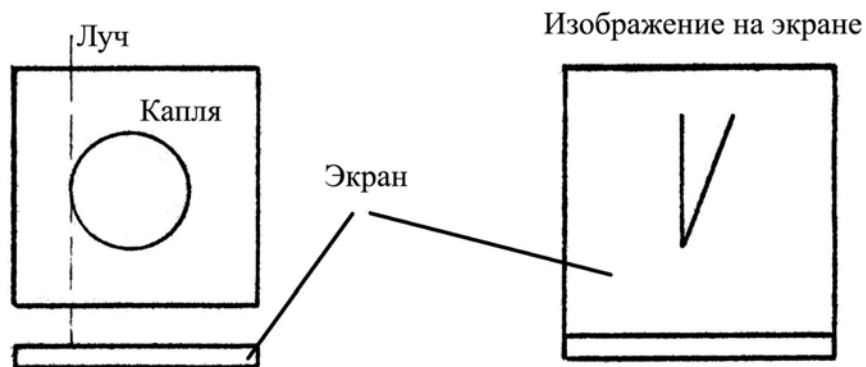


Рис.5. Лазерная установка для измерения угла смачивания: 1- лазер; 2 – горизонтальный столик; 3 – капля жидкости на подложке; 4 – экран



На горизонтальный столик 2 (рис.5) устанавливается подложка, на которую из пипетки наносится капля жидкости (воды). Вращая специальные винты на столике, устанавливают его таким образом, чтобы луч лазера проходил строго по поверхности подложки, чуть ее касаясь. На экране 4 закрепляют лист бумаги. Далее надо переместить подложку с каплей так, чтобы луч касался края капли, одновременно наблюдая за изображением на экране. При правильных действиях на экране видны две отчетливые линии, одна из которых строго вертикальная, а другая отклонена от первой, образуя угол, равный углу смачивания. Изображение переносится на закрепленный на экране лист бумаги карандашом, вклеивается в отчет, а угол измеряется транспортиром. Рекомендуется произвести несколько замеров и усреднить полученные значения угла смачивания.

При выполнении работы необходимо придерживаться следующих последовательностей действий:

- 4.1. Получить у лаборанта необходимое количество подложек (по заданию преподавателя). Подложки могут быть стеклянными, полупроводниковыми или керамическими.
- 4.2. Для обеспечения воспроизводимых и анализируемых результатов подложки необходимо очистить одним из перечисленных способов (по заданию преподавателя):
  - а) нагревание в хромовой смеси в течение 10 минут (или просто выдерживанием в ней без нагревания);
  - б) нагревание в водном растворе тринатрийфосфата, либо щелочи (обработку можно проводить и без нагревания);
  - в) кипячение в концентрированном растворе кальцинированной соды в течение 10 минут.

После жидкостной обработки подложки необходимо тщательно промыть в дистиллированной воде, высушить при помощи фильтровальной бумаги, а затем в сушильном шкафу в течение 10 минут; затем подложки протереть ацетоном и поставить в сушильный шкаф на 20 минут при температуре 80 °С для окончательной сушки.

Внимание! Визуально чистые подложки должны быть без разводов и следов от остатков отмывочных растворов.

- 4.3. Далее для одной из очищенных подложек провести тест на чистоту поверхности, при этом могут быть использованы методики: с использованием фигур запотевания, определения краевого угла смачивания или растекания капли жидкости по поверхности. На хорошо очищенных поверхностях капли одинакового объема будут растекаться на большой площади.
- 4.4. Оставшиеся чистые подложки необходимо искусственно загрязнить различными типами загрязнения (по заданию преподавателя):

- «заляпать» руками по всей площади пластины;
- ватным тампоном на пинцете нанести по всей поверхности пластины равномерный слой жирного растворителя (бензол, толуол и т.д.);
- ватным тампоном на пинцете нанести по всей площади пластины четыреххлористый углерод;
- нанести на поверхность и растереть технический вазелин;
- загрязнить поверхность очень незначительным количеством вакуумной смазки. Дать выстояться загрязненным поверхностям в течение 5-10 минут, после чего они готовы к дальнейшим испытаниям.

Одну подложку (тестовую) оставить чистой.

- 4.5. Нанести на чистую тестовую подложку тонкую металлическую пленку либо методом вакуумного испарения, либо магнетронного распыления.
- 4.6. Затем нанести металлические пленки на загрязненные поверхности тем же методом, что и в п. 4.5. Напыление пленок на чистую и загрязненные поверхности следует проводить в различных партиях эксперимента.
- 4.7. После нанесения пленок произвести их визуальный осмотр и результаты осмотра занести в таблицу формы 3.
- 4.8. Испытать полученные металлические слои на подложках на факт их истирания, для этого провести по поверхности пластины несколько раз сухим ватным тампоном. Результаты занести в таблицу формы 3.
- 4.9. Оставшиеся после истирания металлические слои испытать на прочность их сцепления с подложкой на ультразвуковой установке, зафиксировав время их разрушения под действием ультразвука. Результаты испытаний занести в таблицу формы 3.
- 4.10. По результатам работы сделать выводы.

**ВНИМАНИЕ!** Так как данная работа многовариантна, то обязательно необходимо в лабораторном журнале вести протокол испытаний, фиксируя все свои действия, используемые рецептуры и реактивы, а также различные методы. Без протокола лабораторная работа преподавателем не принимается и считается не выполненной.

### ***Контрольные вопросы***

1. Какие типы загрязнений вы знаете, и что является их источником в технологии микроэлектроники?
2. Приведите общую классификацию методов очистки подложек с их преимуществами и недостатками, охарактеризуйте наиболее вероятные их области применения.
3. Охарактеризуйте метод очистки - обезжиривание в органических растворителях: область его применения, используемые реактивы, назначение, преимущества и недостатки.
4. Охарактеризуйте метод очистки - обезжиривание в активных средах: область его применения, используемые реактивы, назначение, преимущества и недостатки.
5. Охарактеризуйте метод очистки - химическое травление: область его применения, используемые реактивы, назначение, преимущества и недостатки.
6. Охарактеризуйте типы правителей, применяемых в технологии микроэлектроники для целей жидкостной обработки.
7. Охарактеризуйте методы жидкостного травления германия в технологии микроэлектроники: схемы химических реакций, условие их проведения.

8. Охарактеризуйте методы жидкостного травления кремния в технологии микроэлектроники: схемы химических реакций, условие их проведения.
9. Типы используемых травителей в технологии микроэлектроники для жидкостной обработки полупроводниковых материалов: примерный состав, назначение компонентов.
10. Охарактеризуйте метод очистки подложек - термоотжиг: область его применения, назначение, преимущества и недостатки.
11. Охарактеризуйте метод обработки подложек – ионное травление: область его применения, назначение, преимущества и недостатки.
12. Охарактеризуйте метод обработки подложек – ионно-плазменное травление: область его применения, назначение, преимущества и недостатки.
13. Охарактеризуйте метод обработки подложек – плазмохимическое и ионно-химическое (реактивное) травление: область его применения, назначение, преимущества и недостатки.
14. Каким образом можно определить и как выразить скорость химического (плазмохимического) травления подложек, используемых в технологии микроэлектроники.
15. Каким образом можно оценить качество очистки подложек, привести примеры и характеристику методов.
16. Как влияют различные типы загрязнений на качество готовых изделий в технологии микроэлектроники.
17. Зачем необходимо поддерживать необходимую чистоту подложек, материалов, реактивов и т.д. в технологии микро- и наноэлектроники, привести примеры отрицательного воздействия различных типов загрязнений на технологический процесс (возникновение брака).

## **Лабораторная работа 9**

### **Технологии получения тонких металлических пленок**

#### ***Цель работы***

1. Ознакомиться с методами получения тонких металлических пленок в технологии микроэлектроники методом вакуумного испарения и магнетронного распыления.
2. Получить практические навыки работы на технологическом и лабораторном оборудовании, позволяющем получать тонкие пленки металлов на различных подложках.

Данная лабораторная работа может использоваться как самостоятельная, так и в качестве расширения (дополнения) других лабораторных работ курса технологии микро- и наноэлектроники.

#### ***Теоретические сведения***

В производстве полупроводниковых приборов и ИМС широко используются тонкие металлические и диэлектрические пленки. Металлические пленки применяют для изготовления тонкопленочных резисторов и конденсаторов, коммутационных элементов и контактных площадок, омических контактов, разводки и т.п. В зависимости от назначения элементов ИМС используют как пленки из платины, золота, серебра, никеля, хрома, меди, алюминия, титана, молибдена, так и многослойные пленочные структуры.

Наибольшее распространение получили следующие методы нанесения тонких пленок:

- термическим испарением материалов в вакууме (резистивным и высокочастотным нагревом, нагревом электронным лучом или лазером);
- ионным распылением (катодным, ионно-плазменным или магнетронным) и
- ионно-термическим испарением.

*Термическое испарение в вакууме* по сравнению с другими методами обладает рядом преимуществ. Так, в высоком вакууме ( $10^{-4}$ - $10^{-7}$  Па) можно наносить особо чистые пленки, т.е. мало загрязненные молекулами остаточных газов ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$  и др.). Относительная простота метода, а также возможность автоматизации процесса позволяют осаждать пленки с воспроизводимыми параметрами. Термическое испарение основано на создании направленного потока пара вещества и последующей его конденсации на поверхности подложек, температура которых существенно ниже температуры источника пара. Типовая рабочая камера установки термического испарения показана на рисунке 1.

Процесс термического испарения состоит из трех основных этапов: испарения вещества; переноса его паров к подложкам; конденсации на них и образовании пленочной структуры. При нагревании до определенной температуры вещество испаряется, кинетическая энергия его частиц (атомов и молекул) возрастает, в результате чего увеличивается вероятность разрывов межатомных и межмолекулярных связей. Отрываясь от поверхности, частицы вещества распространяются в свободном пространстве, образуя пар. При этом возможны две схемы испарения: твердая фаза - жидкая фаза - парообразная фаза и твердая фаза - парообразная фаза (сублимация). Вторую схему испарения также часто называют возгонкой. При этом частицы вещества испаряются с поверхности, создавая в замкнутом объеме  $V$  некоторое давление пара  $p$ . Одновременно происходит обратный процесс - конденсация. При  $V = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$  и  $p = \text{const}$  скорости испарения  $v_{\text{и}}$  и конденсации  $v_{\text{к}}$  равны. Условия, при которых соблюдается равенство,



называют равновесными (состояние насыщения), а образующийся при этом пар - насыщенным. Температуру, при которой давление насыщенного пара вещества примерно равно 1 Па, называют температурой испарения ( $T$ ).

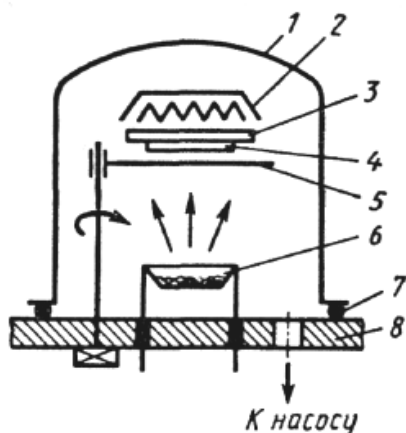


Рис.1. Схема термического испарения в вакууме: 1-колпак; 2-нагреватель подложек; 3-подложкодержатель; 4-подложка; 5-заслонка; 6-испаритель; 7-уплотнительная прокладка; 8-опорная плита установки

При нанесении пленок вещество должно испаряться в молекулярном режиме, так как при этом создается молекулярный пучок, частицы которого перемещаются от испарителя к подложке прямолинейно, без столкновений и рассеяния. Эти условия достигаются при давлении остаточных газов  $p < 10^{-2}$  Па, а насыщенного пара  $p_s < 10^2$  Па. При таком режиме скорость испарения, которую можно оценить по формуле:  $u_u = 0,0585 \cdot p_s \cdot \sqrt{M/T}$  оказывается невысокой. Здесь  $M$  – молекулярная масса испаряемого вещества, а  $T$  – температура испарения. При  $p_s > 10^2$

Па скорость испарения оказывается настолько велика, что над поверхностью подложек образуется слой пара, затрудняющий молекулярное истечение пара. При  $p > 10^{-2}$  Па также создаются условия для немоллекулярного режима испарения, так как длина свободного пробега частиц меньше расстояния между подложкой и испарителем. Кроме того, форма молекулярного пучка должна быть такой, чтобы обеспечивалась максимальная направленность движения частиц испаряемого вещества к подложке. Для осаждения равномерной по толщине пленки плотность падающего пучка частиц должна быть одинаковой по всей площади поверхности подложки.

Конденсация паров зависит от температуры подложки и плотности молекулярного пучка. Приближаясь к подложке, частицы вещества попадают в поле сил притяжения ее поверхностных атомов и молекул. Вместе с тем на очень близком расстоянии на частицы вещества действуют также силы отталкивания. Атомы (молекулы) испаряемого вещества, достигшие подложки, могут мгновенно отразиться от нее (упругое столкновение), адсорбироваться и через некоторое время вновь отразиться (реиспариться), а также адсорбироваться и после кратковременного мигрирования по поверхности остаться на ней, т.е. происходит конденсация. Если энергия связи частиц вещества с атомами подложки больше средней энергии атомов подложки, они конденсируются, а в ином случае отражаются от нее. Температура подложки, выше которой все частицы вещества отражаются от ее поверхности и пленка при этом не образуется, называемая *критической температурой*, зависит от физико-химических свойств материалов осаждаемой пленки и подложки, а также от состояния поверхности подложки.

Наименьшую плотность, при которой частицы осаждаемого вещества конденсируются на подложке при данной ее температуре, называют *критической плотностью молекулярного потока*. При «нахождении» молекулами осаждаемого вещества мест, соответствующих минимуму свободной энергии системы молекула-подложка, образуются зародыши. Рост зародышей происходит в результате присоединения новых молекул, мигрирующих по поверхности или попадающих на зародыш непосредственно из пространства между источником и подложкой. Размер зародыша, при котором он обладает минимальной устойчивостью, называется

*критическим*. Зародыш критического размера распадается даже при удалении от него всего одной молекулы и, наоборот, при добавлении ее становится более устойчивым. При росте и объединении зародышей образуются островковые структуры, а затем - сплошная пленка.

Конденсация вещества на подложке определяется *коэффициентом конденсации (аккомодации)*:  $a_k = n_k / n_{об}$ , где  $n_{об}$  - количество атомов или молекул, достигших поверхности в единицу времени;  $n_k$  - количество частиц, закрепившихся на поверхности.

Как уже отмечалось, при большом давлении в рабочей камере присутствуют остаточные ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ) и другие газы, которые не только уменьшают среднюю длину свободного пробега молекул, но насыщают пленку, химически взаимодействуют с ней, образуя соединения, изменяющие первоначальные свойства осаждаемого вещества.

Скоростью испарения, зависящей от температуры, определяется производительность процесса, возможность химического взаимодействия остаточных газов и испаряемого вещества, а также условия его кристаллизации на подложке. Так, при низких скоростях испарения в пролетном пространстве успевают произойти химические реакции и образуются оксиды, гидриды, нитриды и другие соединения, обладающие иными, чем осаждаемое вещество, свойствами и скоростями миграции по поверхности подложки. В результате этого изменяются условия кристаллизации, структура и электрические параметры осаждаемой пленки.

Температурой подложки определяется взаимодействие ее материала с остаточными газами, а также интенсивность химического взаимодействия этих газов и материала пленки. При повышении температуры улучшается десорбция, уменьшается газонасыщение и создаются условия термодинамического равновесия. В результате этого формируются сплошные и бездефектные пленки, обладающие хорошей адгезией, имеющие ненапряженную структуру и оптимальные размеры зерен. Однако следует помнить, что значительное повышение температуры подложки увеличивает критический размер зародышей и может привести к сохранению островковой структуры, что, в свою очередь, вызывает неравномерность пленки по толщине и ухудшение ее электрофизических параметров. Это особенно важно при изготовлении тонкопленочных резисторов (толщина пленки 0,35 - 0,6 мкм). Обычно температуру подложек выбирают в интервале от 30 до 400 °С.

Цель термической обработки осажденных пленок - снятие в них напряжений и предотвращение рекристаллизации, которая может происходить при повышенных температурах, возникающих при прохождении тока через элементы. Правильный выбор температуры термообработки  $T_{об}$ , ее времени и давления остаточных газов  $p$  способствует стабилизации структурных, а следовательно, и электрофизических параметров пленок. Так, для большинства резистивных пленок  $T_{об} = 300 - 450$  °С; время - 1 - 4 часа,  $p = 10^{-3} - 10^{-4}$  Па. Ухудшение вакуума, т.е. увеличение давления, интенсифицирует процессы химического взаимодействия испаряемого вещества с остаточными газами.

В зависимости от способа нагрева осаждаемого вещества различают *резистивные, электронно-лучевые и индукционные испарители*.

Резистивные испарители изготавливают из проволоки и лент тугоплавких металлов, а также из графита и диборида титана  $TiB_2$ . Некоторые типы резистивных нагревателей показаны на рисунке 2. Недостатки резистивных испарителей - загрязнение наносимой пленки материалом нагревателя или тигля, малый срок службы, невозможность испарения тугоплавких материалов.

Электронно-лучевые испарители (рисунок 3а) основаны на преобразовании

кинетической энергии электронов в энергию нагрева при бомбардировке ими испаряемого материала. Эти испарители применяются при нанесении пленок тугоплавких материалов, не загрязняют камеру материалом нагревателя и тигля и могут быть использованы более длительное время, чем резистивные. Однако при электронной бомбардировке некоторые материалы разлагаются на фракции с выделением газообразных веществ. Обычно площадь сфокусированного электронного пучка 3—60 мм<sup>2</sup>, напряжение на аноде 6 - 10 кВ, скорость испарения до 5 мг/с.

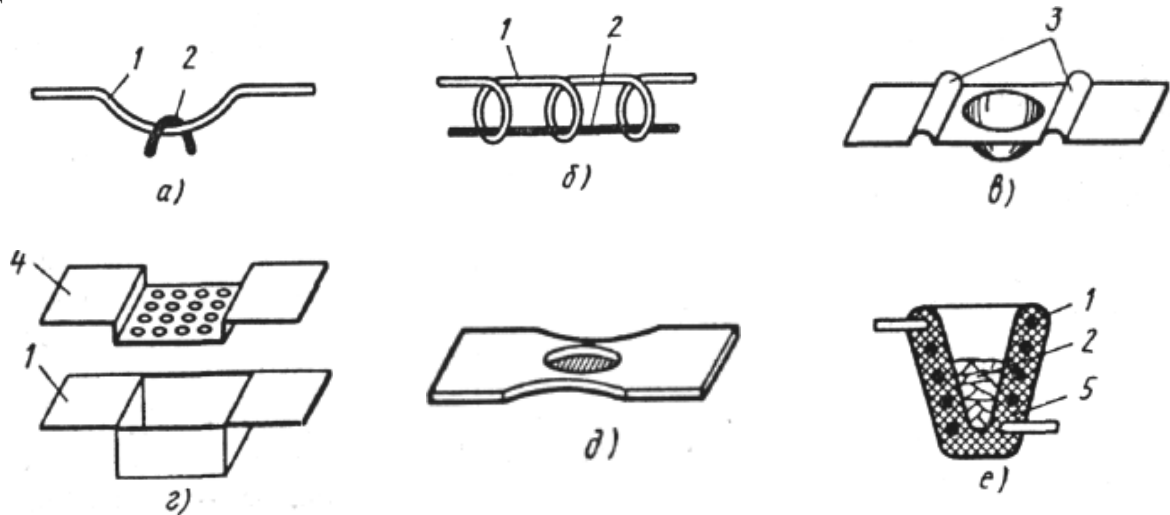


Рис. 2. Резистивные испарители: а, б – проволочные; в, г, д – ленточные; е – тигельный; 1 – нагреватель; 2 – испаряемое вещество; 3 – компенсаторы; 4 – крышка; 5 – тигель.

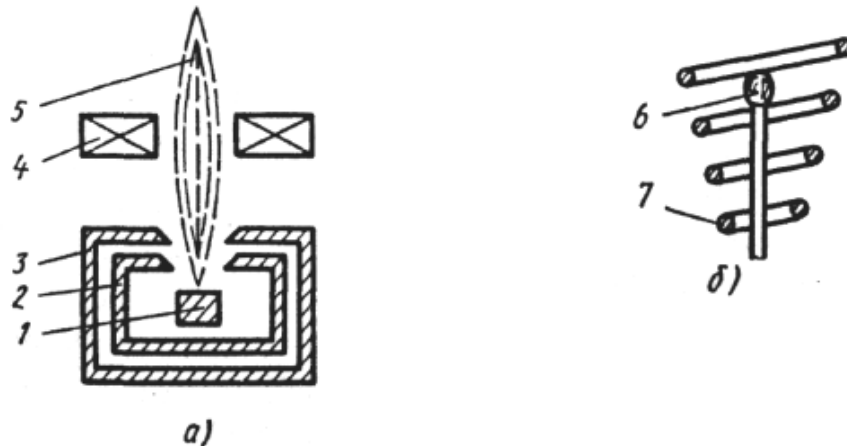


Рис.3. Электронно-лучевой (а) и индукционный (б) испарители: 1-катод; 2-управляющий электрод; 3-анод; 4-магнитная фокусирующая система; 5-электронный пучок; 6-испаряемый материал; 7-индуктор.

Индукционные испарители (рисунок 3б) основаны на разогреве материала высокочастотным магнитным полем, создаваемым индуктором. Основной недостаток этих испарителей - значительная зависимость скорости испарения вещества от его массы.

*Катодное, ионно-плазменное и магнетронное распыление* существенно отличаются от термического испарения. Так, при катодном распылении материалов процесс происходит при давлении от 1 до 10<sup>2</sup> Па, скорость роста пленки меньше, чем при термическом испарении и она формируется в газовом разряде. Катодное распыление основано на том, что поток положительно заряженных ионов газа (например, аргона), получивших энергию от сотен электронвольт до единиц килоэлектронвольт, направляют на мишень, выполненную из распыляемого вещества. Ионной бомбардировкой из мишени выбиваются частицы вещества, которые оседают на подложке в виде тонкой пленки. В зависимости от способов

ионизации газа, т.е. создания плазмы и распыления мишени, ионные источники подразделяют на диодные, триодные и магнетронные.

В диодных источниках поток электронов, необходимый для ионизации рабочего газа, образуется в результате автоэлектронной эмиссии. В таких источниках бомбардируемая ионами газа мишень одновременно является катодом и поэтому называется *катодом-мишенью*. Осаждение вещества происходит на подложку, располагаемую на аноде. Если распыляемая мишень металлическая, то распыление ведется при постоянном токе, а если диэлектрическая, - при переменном. Во втором случае при отрицательной полярности мишень распыляется, а при положительной с нее снимается накопленный отрицательный заряд. Диодные системы (рисунок 4а) наиболее просты и состоят из катода-мишени 1, анода 3 и подложки 2, размещенных в рабочей камере, в которой первоначально создается вакуум  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  Па; затем в камеру напускается инертный газ до давления 1,3-13 Па. При подаче на электроды напряжения 1-5 кВ электроны с катода-мишени устремляются в сторону анода, ионизируя инертный газ, в результате чего возникает тлеющий разряд и образуется плазма. Схема ионизации рабочего газа выглядит следующим образом:  $Ar + e^- \rightarrow Ar^+ + 2e^-$ . Положительные ионы плазмы, ускоряясь в электрическом поле, устремляются к катоду-мишени, бомбардируют и распыляют ее.

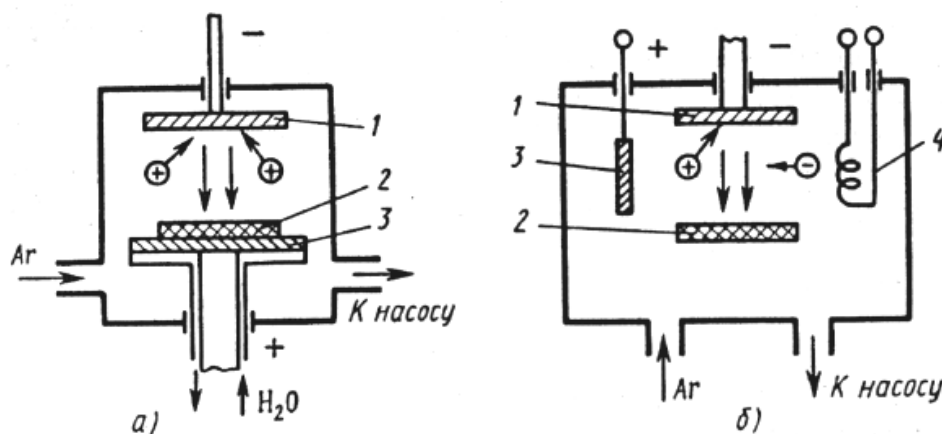


Рис.4. Ионные источники испарения: а – диодный, б – триодный;  
1-катод-мишень, 2-подложка, 3-анод, 4-термокатод.

В триодных источниках, называемых также *ионно-плазменными* (рисунок 4,б), третий электрод выполняет функцию термоэмиссионного катода, увеличивая концентрацию электронов, а следовательно, и ионизированных атомов рабочего газа (аргона). Причем увеличение количества ионов аргона возможно при уменьшении его давления до  $10^{-1}$ - $10^{-2}$  Па, что обеспечивает нанесение пленок, не загрязненных посторонними примесями. Кроме того, наличие термокатода позволяет приблизить мишень к подложке, что увеличивает скорость нанесения пленки. Как и в диодных источниках, рабочую камеру предварительно откачивают до давления около  $10^{-4}$  Па. Затем подают ток накала на вольфрамовый термокатод, который разогревается до температуры возникновения термоэлектронного тока высокой плотности. Напряжение между раскаленным термокатодом и анодом равно 200 В, а давление аргона в рабочей камере –  $10^{-1}$ - $10^{-2}$  Па. Электроны, испускаемые термокатодом, ионизируют молекулы аргона, которые после подачи отрицательного потенциала на катод-мишень (3-5 кВ), вытягиваясь из плазмы, бомбардируют и распыляют ее поверхность.

Особенностью триодных источников распыления является безынерционность: распыление после снятия потенциала с катода-мишени мгновенно прекращается. Так как энергия ионов, распыляющих мишень, очень велика, в разрядной камере и на

мишени выделяется большое количество теплоты. Поэтому такие системы требуют охлаждения.

В магнетронных источниках (рисунок 5), выполненных на основе диодных систем, в разрядном промежутке одновременно с электрическим действует магнитное поле, что позволяет без увеличения концентрации электронов повысить плотность плазмы.

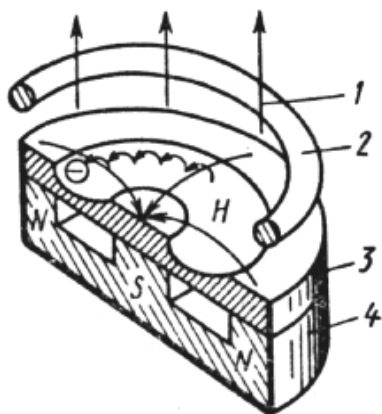


Рис.5. Схема магнетронного распыления:  
1-поток распыляемого вещества;  
2-кольцевой анод; 3-катод-мишень;  
4-магнитная система.

На электроны, эмиттированные автоэмиссионным катодом-мишенью 3 и движущиеся к кольцевому аноду 2 в приложенном между ними электрическом поле, действует магнитное поле  $H$ , направленное перпендикулярно электрическому. При перекрещивании полей путь движения электронов удлиняется (они движутся по спирали), что повышает вероятность их столкновения с молекулами рабочего газа. В результате при давлении  $10^{-1}$ - $10^{-2}$  Па создается высокая концентрация ионов газа, которые движутся к катоду-мишени, бомбардируя ее и распыляя с большой интенсивностью. Поток  $I$

распыляемого вещества устремляется к подложке и осаждается на ней в виде пленки. Достоинствами магнетронных систем, используемых для распыления металлов, полупроводников и диэлектриков, являются: низкое рабочее давление, позволяющее уменьшить количество газовых включений в осаждаемой пленке; высокая скорость нанесения пленки; надежность и стабильность параметров напылительной системы; широкий диапазон толщин пленок при их высокой адгезии и однородности.

**Ионно-термическое испарение** является комбинацией термического испарения и ионного распыления и выполняется следующими методами:

- резистивным или электронно-лучевым испарением вещества с последующей ионизацией его паров в плазме рабочего газа;
- резистивным или электронно-лучевым испарением вещества с последующей ионизацией его паров (например, с помощью высокочастотного индуктора);
- высокочастотным термическим испарением вещества с одновременной высокочастотной ионизацией его паров.

Во всех случаях движение ионов испаряемого вещества к подложке и осаждение на ней обусловлены действием электрического поля, создаваемого между испарителем и подложкой. В зависимости от требуемой кристаллической структуры и адгезии осаждаемых пленок потенциал подложки может быть от 0 до  $10^4$  В. Так, при низких температурах подложки, чтобы получить удовлетворительную адгезию пленки к ней, потенциал необходимо увеличивать.

Достоинствами ионно-термического испарения являются: большая скорость процесса, свойственная термическому испарению, в сочетании с высокой энергией конденсирующихся частиц, характерной для ионного распыления; однородность и равномерность осаждаемых пленок по толщине; возможность осаждения пленок сложного состава (карбидов, нитридов, оксидов и др.) с большими скоростями без высокотемпературного нагрева подложек. Примеры ионно-термических источников распыления показаны на рисунке 6.

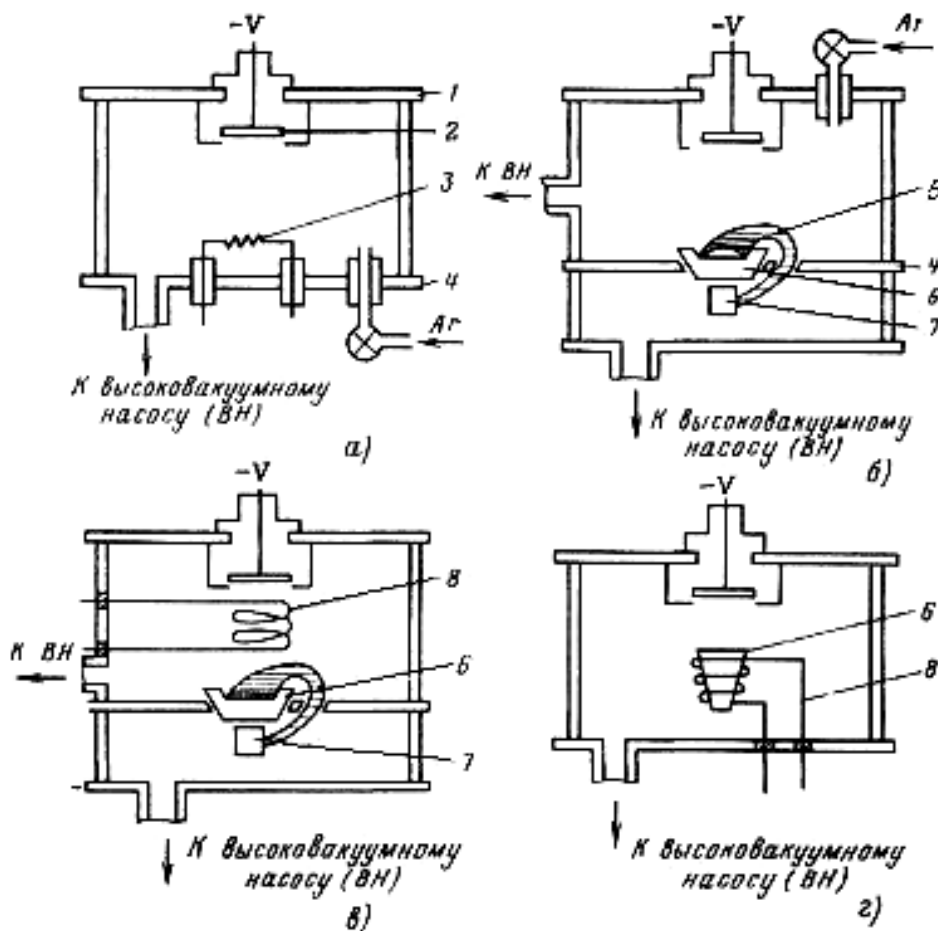


Рис.6. Схемы ионно-термических источников распыления:

*а* – с резистивным испарителем, *б* – с электронно-лучевым испарителем, *в* – с ВЧ ионизацией, *г* – с ВЧ распылением и ионизацией.

1 – верхний фланец камеры; 2 – подложка; 3 – резистивный испаритель; 4 – нижний фланец камеры; 5 – электронный пучок; 6 – тигель; 7 – электронно-лучевая пушка; 8 – индуктор;

### **Описание лабораторного макета**

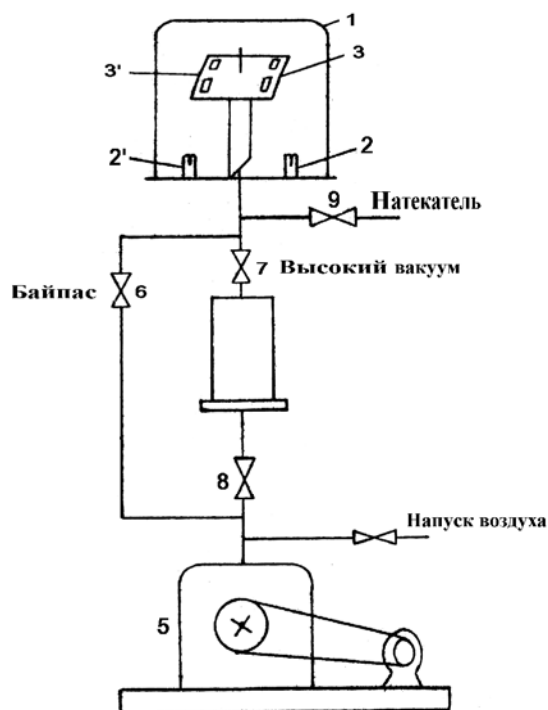
1. Напыление тонких металлических пленок методом вакуумного испарения алюминия или меди осуществляется на установке ПОРА-1М, вакуумная схема которой показана на рисунке 7. Основной частью установки является стеклянный вакуумный колпак 1, устанавливаемый на металлической подставке с резиновой прокладкой. Рабочее пространство под колпаком разделено на две части, соответственно на камеры для напыления алюминия и меди.

**ВНИМАНИЕ!** Для обеспечения чистоты получаемых пленок не допускается менять местами испарители для алюминия и меди.

Навеска металла в виде отрезка проволоки помещается в соответствующий испаритель 2 или 2' под колпаком. Подложки помещаются на подложкодержатели 3 и 3' в непосредственной близости от испарителей – 2 и 2'. Вакуумные краны, диффузионный и форвакуумный насосы, а также вакуумные магистрали смонтированы под защитным кожухом.

**ВНИМАНИЕ!** Разбирать защитный кожух с целью получения доступа к вакуумным магистралям категорически запрещается.

Тумблера управления насосами и вентили вакуумных кранов выведены на переднюю панель защитного кожуха. Испарители управляются от отдельного блока в составе установки ПОРА-1М.



Внешний вид камер для испарения металла

Рис.7. Установка ПОРА-1М:

1 – стеклянный колпак, 2 и 2' – испарители для меди и алюминия соответственно; 3 и 3' – подложкодержатели соответственно для меди и алюминия; 4 – диффузионный насос; 5 – форвакуумный насос; 6 – кран вакуумной магистрали БАЙПАС; 7 – кран «ВЫСОКИЙ ВАКУУМ»; 8 – кран «ФОРВАКУУМ»

2. Нанесение пленок меди методом магнетронного распыления осуществляется на установке, вакуумная схема которой показана на рисунке 8. Магнетронная распылительная система смонтирована на металлическом фланце, соединенном с вакуумной системой трубопроводом. Распылительная мишень (катод) толщиной 10 мм и диаметром рабочей части 50 мм изготовлена из меди вакуумной плавки и закрепляется на корпусе магнетрона через резиновое уплотнение прижимным фланцем. Постоянное магнитное поле создается магнитным блоком, состоящим из центрального и периферических постоянных магнитов, закрепленных на основании блока, в свою очередь изготовленного из магнитомягкого материала. Магнитный блок создает над поверхностью катода магнитное поле порядка 0,02-0,05 Тл. Составляющая этого поля параллельна плоскости катода. Мишень магнетрона имеет принудительное охлаждение проточной водой. Анод изготовлен из латунной трубки и также охлаждается проточной водой. Расстояние от катода до анода составляет 25 мм.

Анод и корпус магнетрона закреплены на фланце с помощью изолированных стоек (на схеме не показаны). Питание разрядной цепи магнетрона осуществляется от источника постоянного тока с напряжением до 2000 В и максимальным током до 1 А. Подложкодержатель расположен от мишени на расстоянии, которое можно менять в пределах от 35 мм до 90 мм. Подложки закрепляются на подложкодержателе с помощью зажимов так, чтобы обеспечивался хороший (равномерный) тепловой контакт подложки с подложкодержателем. Подложкодержатель имеет нулевой потенциал, то есть заземлен. Между подложкодержателем и мишенью магнетрона расположен дополнительный торообразный электрод диаметром 140 мм, изготовленный из меди. Медные трубки

охлаждения анода и мишени магнетрона, являющиеся одновременно электрическими выводами этих электродов, изолированы от фланца керамическими изоляторами и герметизированы клеем К-400. Вывод дополнительного электрода также изолирован и герметизирован. Напуск атмосферного воздуха и рабочих газов осуществляется через трубку, выходной конец которой расположен во фланце магнетронного узла. Давление рабочего газа устанавливается с помощью натекателя. Общий вид установки магнетронного распыления показан на рисунке 9, а конструкция распылительной камеры – на рисунке 10.

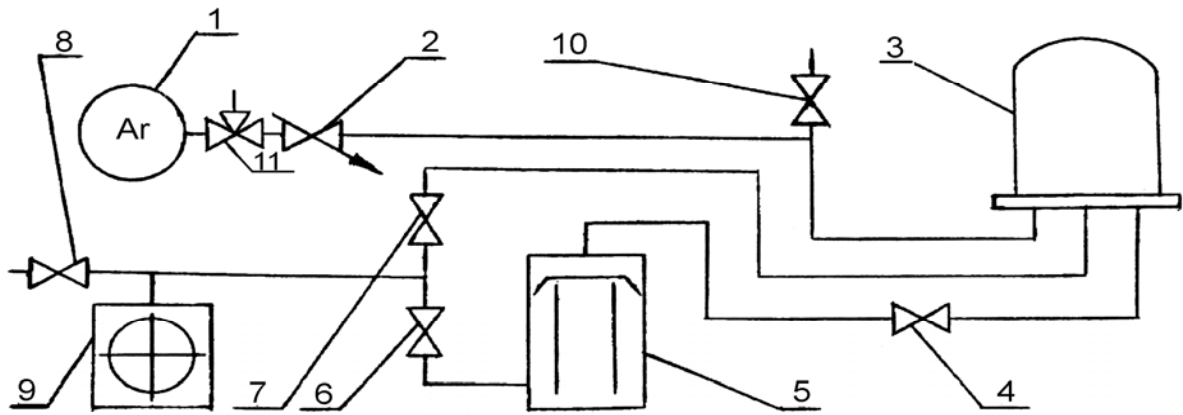


Рис.8. Вакуумная схема установки магнетронного распыления:

- 1-объем с рабочим газом (хлорвиниловая емкость); 2-натекатель;
- 3-распылительная камера с магнетроном; 4-кран «ДИФФУЗИОННЫЙ НАСОС»;
- 5-диффузионный насос; 6-кран «ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС»; 7-кран «БАЙПАС»;
- 8-клапан напуска воздуха; 9-форвакуумный насос; 10-напуск воздуха в рабочую камеру;
- 11-трехходовой кран напуска рабочего газа (атмосферы).

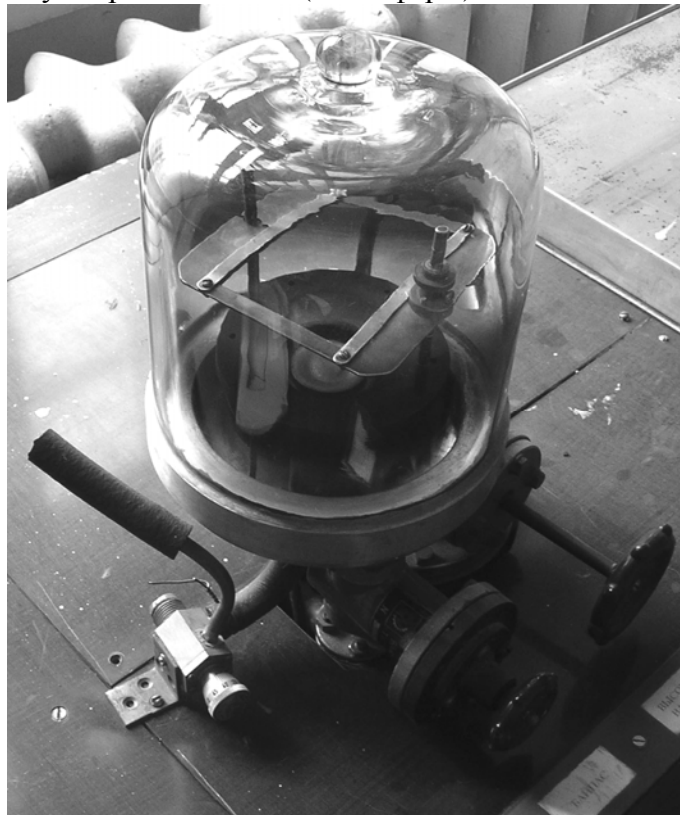


Рис.9. Внешний вид установки магнетронного распыления



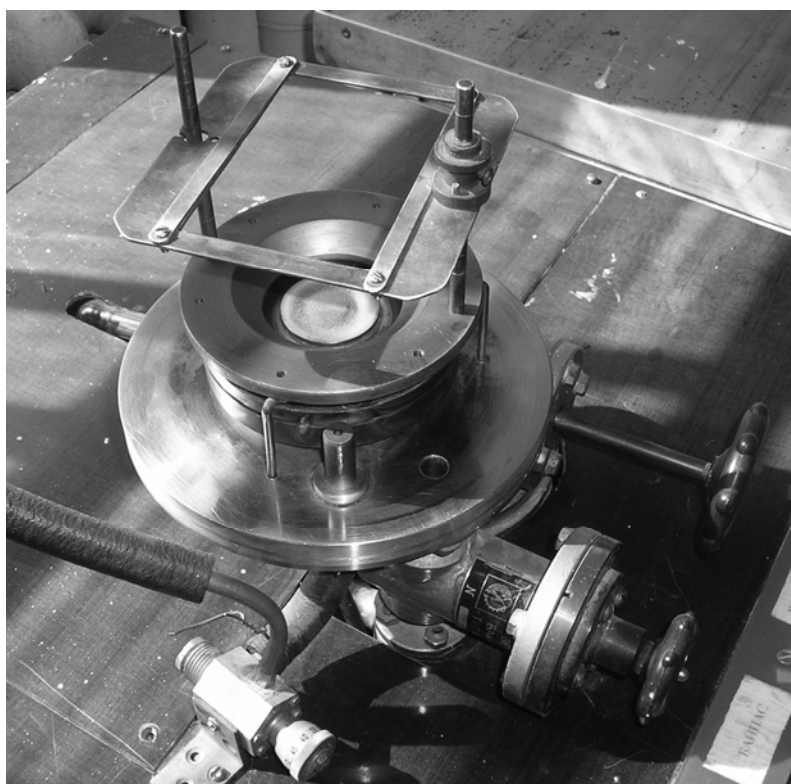
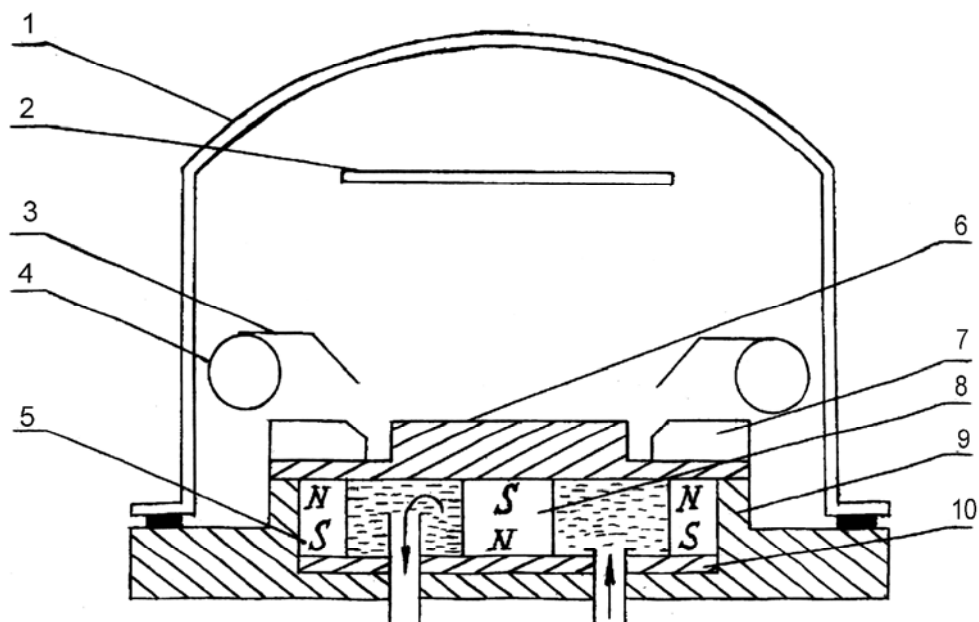


Рис.10. Конструкция распылительной камеры:

1-стеклянный колпак; 2-подложкодержатель;3-подолнительный электрод; 4-анод; 5-периферийные магниты; 6-катод; 7-фланец; 8-центральный магнит; 9-корпус магнетрона; 10-основание магнитного блока.

3. Для оценки качества сцепления металлических пленок с подложкой используется ультразвуковой дезинтегратор типа UD-20 (рисунок 11). Дезинтегратор также может быть использован для смешивания, диспергирования, эмульгирования и отмывки. Его принцип действия заключается в генерации ультразвуковой энергии и введении ее в исследуемую среду. Введение энергии в исследуемую среду осуществляется концентратором (сонотродом). Ультразвуковая энергия вырабатывается в керамическом преобразователе типа «сэндвич» питаемом от генератора мощности непрерывной волной частотой около 22 кГц. Рабочая частота автоматически поддерживается на резонансной частоте механических колебаний

преобразователя посредством системы обратной связи. Это позволяет преобразовывать энергию с максимальной эффективностью. Введение ультразвуковой энергии в жидкость вызывает образование в ней кавитационных пузырьков. Сокращения кавитационных пузырьков служит источником ударных волн. Они создают значительные давления и механические силы. Интенсивность этих явлений можно регулировать путем изменения амплитуды колебаний, что позволяет интенсифицировать процессы коагуляции, разрыва, смешения, отщепления пленок и загрязнений. Рабочая частота прибора -  $22 \pm 1,65$  кГц; стабилизированная амплитуда колебаний на конце концентратора соответственно в 5 диапазонах составляет: 1-8 мкм, 2-10 мкм, 3-12 мкм, 4-14 мкм, 5-16 мкм; максимальная выходная мощность – 180 Вт. Прибор начинает работать немедленно после включения. Непрерывная работа может осуществляться до 4 часов после включения. В приборе использован пьезокерамический преобразователь типа «Сандвич». Концентратор имеет наконечник из химически нейтрального материала. В составе установки может использоваться рабочий объем сосуда до 40 мл. Органы управления ультразвуковым дезинтегратором выведены на переднюю панель (рисунок 12).

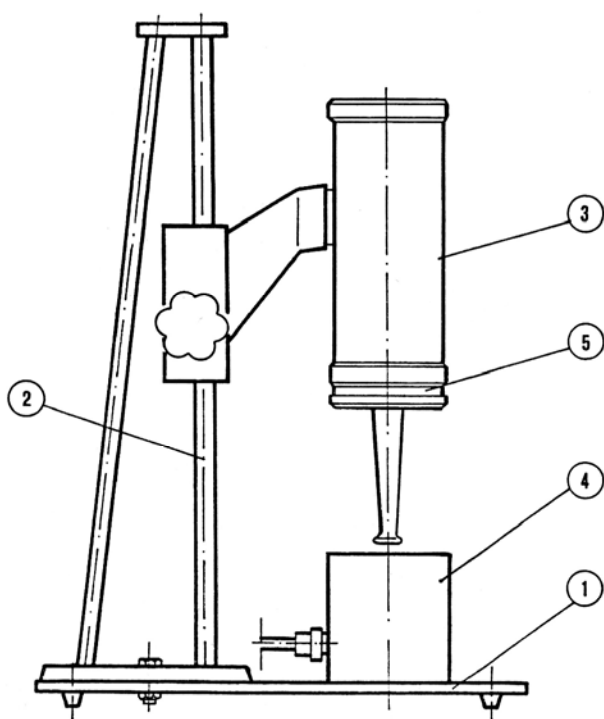


Рис.11. Ультразвуковой дезинтегратор UD-20:  
1-основание; 2-штатив; 3-концентратор; 4-сосуд с жидкостью и погруженными в нее образцами; 5-кожух.

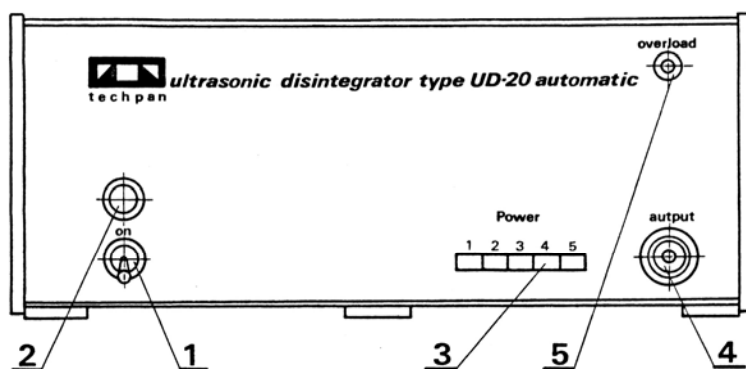


Рис.12. Лицевая панель прибора UD-20:  
1-сетевой выключатель; 2-сигнальная лампочка включения сети; 3-переключатель диапазонов; 4-гнездо выхода генератора; 5-сигнальная лампочка перегрузки.

Исследуемые образцы помещаются в сосуд с жидкостью с дистиллированной водой (или другой жидкостью – по заданию преподавателя), сосуд помещается на основание прибора и далее концентратор своим концом опускается в жидкость на расстояние не менее 0,5–1 см от поверхности жидкости. Затем устанавливается

необходимый режим работы прибора и включается сетевой тумблер. Для анализа результатов обработки необходимо точно зафиксировать время обработки. По истечении необходимого времени – выключается сетевой тумблер, образцы извлекаются и подвергаются анализу: либо визуальному осмотру, либо рассмотрению под микроскопом. Перед тем как рассматривать образцы под микроскопом, они должны быть высушены.

4. В зависимости от вида задания студенту выдаются следующие материалы и комплектующие:

- необходимое количество подложек для нанесения тонких металлических пленок;
- реактивы и отмывочные средства для очистки подложек (см. работа № 8);
- протирочный материал (фильтровальная бумага);
- навески напыляемых материалов;
- пинцет;
- комплект лабораторной посуды;
- секундомер;
- микроскоп.

### ***Требования к отчету***

*Отчет должен содержать:*

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Протокол выполнения операций при работе на установках.
5. Результаты выполнения работы (образцы подложек с запыленными пленками, заполненные формы таблиц).
6. Выводы по работе, в которых должны быть отражены возможные причины возникновения брака при напылении пленок.

### ***Лабораторное задание***

*Домашняя работа:*

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить (выполнить) пункты 1 и 2 требований к отчету.
3. Изучить теоретическое введение и оформить его в виде пункта 3. Категорически запрещается копирование теоретического введения любыми средствами множительной техники. Схемы установок должны быть выполнены с использованием чертежных инструментов.
4. Подготовить формы таблиц (таблицы 1 и 2).

Форма таблицы 1

Результаты лабораторных исследований

Номер образца	Способ получения	Характеристики внешнего вида (краткое описание)	Причины возможного брака
1.			

## Результаты обработки образцов

Номер образца	Время обработки ультразвуком (УЗ), с	Режим обработки УЗ	Характерные признаки изменения внешнего вида
1.			

*Работа в лаборатории:*

1. Проведение очистки подложек по одной из методик, предложенной преподавателем.
2. Нанесение на подложки тонких металлических пленок (по заданию преподавателя)
3. Анализ адгезионных характеристик и оценка качества полученных слоев на подложках.

**Порядок выполнения работы***Вариант 1. Вакуумное напыление пленок на установке ПОРА-1М.*

1. Получить у лаборанта (преподавателя) необходимое количество подложек и навески металла для установки ПОРА-1М.
2. Очистить поверхность подложек по методике, описанной в лабораторной работе №8 (пункт 4.2).
3. Подготовить установку ПОРА-1М и загрузить очищенные образцы в подложкодержатели. Для этого необходимо:
  - проверить первоначальное положение вакуумных кранов установки («НАПУСК ВОЗДУХА В НАСОС» – открыт; «БАЙПАС» – закрыт; «ФОРВАКУУМ» - закрыт; «ВЫСОКИЙ ВАКУУМ» - закрыт; «НАТЕКАТЕЛЬ» - открыт);
  - снять защитную сетку со стеклянного колпака установки;
  - снять колпак и установить его на специальном держателе;
  - осторожно, не касаясь плоскости подложек руками, установить их в подложкодержатели установки ПОРА-1М и закрепить прижимами;
  - при необходимости добавить образец для испарения в тигель нагревательного элемента - медь в тигель с медью, а алюминий в тигель с алюминием;
  - протереть уплотнительную прокладку колпака изопропиловым спиртом, используя пинцет и вату;
  - установить стеклянный колпак по возможности как можно ровнее и затем установить защитную сетку.
  - установить водяным вентилем требуемый напор воды для охлаждения диффузионного насоса (помечен риской).
4. Включить питание установки на пульте управления.
5. Закрыть кран «напуск воздуха в насос» и включить кнопкой на панели управления установкой кнопку, запускающую форвакуумный насос.
6. Закрыть кран «НАТЕКАТЕЛЬ», открыть кран «БАЙПАС» и произвести предварительную откачку рабочего объема испарительных камер через магистраль байпаса.
7. Проверить факт начавшейся откачки объема под стеклянным колпаком (стрелка вакуумметра не должна быть в крайнем левом положении). Если откачка началась успешно можно продолжать выполнение работы.
8. Через 5-10 минут закрыть кран «БАЙПАС» и открыть краны

- «ФОРМАКУУМ» и «ВЫСОКИЙ ВАКУУМ» для предварительной откачки диффузионного насоса. ВНИМАНИЕ! Диффузионный насос никогда нельзя подключать к атмосфере, в противном случае он выйдет из строя.
9. При достижении давления в системе  $10^{-1}$  мм.рт.ст. или 12 делений по шкале вакуумметра (положение отмечено красной рисккой) включить кнопкой на панели управления установкой ПОРА-1М диффузионный насос.
  10. Откачать систему до предельного вакуума (примерно  $10^{-4}$  мм.рт.ст., стрелка вакуумметра при этом будет в крайнем правом положении) и на протяжении всего процесса откачки и работы на установке ПОРА-1М следить за напором воды.
  11. При достижении требуемого вакуума (примерно  $10^{-4}$  мм.рт.ст.) произвести напыление пленок алюминия или меди. Для этого необходимо:
    - не изменяя положение вакуумных кранов подать напряжение на нагревательные элементы испарителей установки ПОРА-1М (перевести переключатель из вертикального положения в одно из положений «медь» или «алюминий» соответственно, включив предварительно блок питания испарителей в сеть 220В);
    - плавно увеличивать напряжение на испарителе ручкой «ЛАТРА», смонтированной на верхней панели блока управления испарителями, до тех пор, пока не заметим слабое свечение раскалившегося нагревательного элемента испарителя;
    - увеличив еще напряжение на испарителе примерно на 10%, зафиксировать момент увеличения давления в системе (стрелка вакуумметра отклонится влево примерно на  $\frac{1}{4}$  шкалы). Этот момент будет характеризоваться максимальной скоростью роста пленки на подложке;
    - сразу после увеличения давления в системе резко снять напряжение на испарителе до нуля (этот момент еще будет характеризоваться ростом пленки на подложке до момента остывания испарителя).
  12. В таком положении подложки должны остыть практически до комнатной температуры (примерно в течение 15-20 минут). В противном случае после разгерметизации установки пленка металла на подложках окислится.
  13. При необходимости дожидаться откачки установки до прежнего разрежения (примерно  $10^{-4}$  мм.рт.ст.) и по аналогии напылить пленку другого металла, используя второй испаритель (п.п.11 и 12);
  14. Произвести разгерметизацию колпака установки и выгрузку подложек с напыленными пленками в следующей последовательности:
    - закрыть кран «ВЫСОКИЙ ВАКУУМ» и проверить, закрыт ли кран «БАЙПАС», если он оказался открыт, то вы плохо изучили предыдущие пункты описания работы, и вам необходимо его закрыть.
    - плавно открывая кран «НАТЕКАТЕЛЬ» напустить воздух под колпак установки ПОРА-1М;
    - снять защитную сетку с колпака установки;
    - осторожно снять колпак, установив его на специальном держателе, и извлечь подложки с пленками из подложкодержателей, по возможности не касаясь плоскости подложек руками.
  15. Если необходимо дальнейшее нанесение пленок на другие подложки, то необходимо их установить на подложкодержателе, далее по приведенной выше методике установить колпак и защитную сетку, предварительно протерев уплотнительное кольцо изопропиловым спиртом, закрыть кран «НАТЕКАТЕЛЬ» и «ФОРВАКУУМ» и произвести предварительную откачку

подколпакового объема установки ПОРА-1М до давления  $10^{-1}$  мм.рт.ст. через магистраль байпаса, соответственно открыв кран «БАЙПАС». После достижения давления в системе  $10^{-1}$  мм.рт.ст. закрыть кран «БАЙПАС», открыть краны «ФОРВАКУУМ» и «ВЫСОКИЙ ВАКУУМ» и откачать систему диффузионным насосом до предельного вакуума (примерно до  $10^{-4}$  мм.рт.ст.). Далее можно приступать к напылению пленок на подложки (для этого повторите пункты 11-14 данного описания).

#### 16. Порядок выключения установки ПОРА-1М.

Если на все подложки, выданные преподавателем, пленки нанесены, то необходимо приступить к выключению установки ПОРА-1М. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

- еще раз проверить правильно ли установлены вакуумные краны: при разгерметизированном колпаке кран «НАТЕКАТЕЛЬ» - открыт, кран «ВЫСОКИЙ ВАКУУМ» - закрыт, кран «БАЙПАС» - закрыт, кран «ФОРВАКУУМ» открыт и производится постоянная откачка диффузионного насоса, кран «НАПУСК ВОЗДУХА В НАСОС» - закрыт, так как работает форвакуумный насос;

- кнопкой на панели управления выключить диффузионный насос, при этом соответствующая лампочка погаснет;

- в таком состоянии, при непрерывной откачке диффузионного насоса форвакуумным насосом, установку следует выдержать в течение 30-40 минут с целью полного остывания диффузионного насоса;

- далее необходимо закрыть кран «ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС», кнопкой на панели управления установкой ПОРА-1М выключить питание форвакуумного насоса и напустить воздух в форвакуумный насос, осторожно открыв кран «НАПУСК ВОЗДУХА В НАСОС»;

- нажать красную кнопку полного выключения питания установки ПОРА-1М, перекрыть вентилем воду для охлаждения диффузионного насоса;

- отключить от сети 220В блок питания испарителями.

#### 17. Параллельно с остыванием диффузионного насоса произвести визуальный или под микроскопом (по заданию преподавателя) осмотр подложек с напыленными пленками. Результаты осмотра занести в таблицу формы 1.

#### 18. В зависимости от задания преподавателя исследовать качество сцепления пленки металла с подложкой, используя ультразвуковой дезинтегратор UD-20 (режим и время обработки подложек ультразвуком уточнить у преподавателя). Результаты исследований занести в таблицу формы 2.

### *Вариант 2. Получение металлических пленок на подложках методом магнетронного распыления.*

1. Получить у преподавателя необходимое количество подложек, очистить их от органических и неорганических примесей кипячением в концентрированном растворе кальцинированной соды, а затем протравить в течение 3-5 мин. в хромовой смеси. При необходимости оценить чистоту тестовой подложки по краевому углу смачивания.
2. Установить чистую подложку на подложкодержателе рабочей камеры установки.
3. Установить колпак рабочей камеры установки.
4. Убедиться в наличии установленной емкости с рабочим газом (азотом).
5. Включить и отрегулировать водяное охлаждение диффузионного насоса.
6. Включить электропитание установки магнетронного распыления.

7. Проверить положение вакуумных кранов: «НАТЕКАТЕЛЬ» - закрыт, «БАЙПАС» - открыт, краны «ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС» и «ДИФФУЗИОННЫЙ НАСОС» - закрыты.
8. Тумблером «форвакуумный насос» включить форвакуумный насос установки магнетронного распыления. При этом загорится индикатор «форвакуумный насос включен».
9. Перекрыть кран «НАПУСК РАБОЧЕГО ГАЗА», полностью открыть «НАТЕКАТЕЛЬ» и откачать газовую магистраль до давления  $10^{-1}$  мм.рт.ст. или 12 делений по шкале вакуумметра ВИТ-3.
10. При достижении давления в системе  $10^{-1}$  мм.рт.ст. или 12 делений по шкале вакуумметра ВИТ-3 тумблером «диффузионный насос» включить диффузионный насос. При этом загорится индикатор «диффузионный насос включен».
11. Далее вакуумные краны привести в следующее положение: «БАЙПАС» - закрыт, краны «ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС» и «ДИФФУЗИОННЫЙ НАСОС» - открыты.
12. Откачать систему до предельного вакуума (примерно 90 делений по шкале вакуумметра ВИТ-3). Строго следить за напором воды.
13. При достижении требуемого разрежения в системе полностью закрыть «НАТЕКАТЕЛЬ» и переключить трехходовой кран «НАПУСК РАБОЧЕГО ГАЗА» на подачу рабочего газа (аргона).
14. Продолжить откачку системы до достижения предельного вакуума (примерно  $10^{-4}$  мм.рт.ст.), при этом стрелка вакуумметра отклонится в крайнее правое положение.
15. С помощью «НАТЕКАТЕЛЯ» установить требуемое давление рабочего газа в напылительной камере (желательно, чтобы оно было точно равно  $8 \cdot 10^{-2}$  мм.рт.ст – 80 делений по шкале вакуумметра).
16. Включить тумблер «высокое напряжение». При этом включится индикатор «высокое напряжение включено».
17. Поворачивая ручку ЛАТРа установить требуемое напряжение зажигания разряда, при этом газовый разряд можно будет визуально наблюдать через прозрачное стекло колпака напылительной камеры. Рекомендуемый ток распыления мишени 100 мА (20 делений по шкале миллиамперметра). С этого момента начинается процесс распыления мишени и осаждение пленки на подложке.
18. После получения пленки нужной толщины напряжение на мишени ручкой ЛАТРа уменьшить до нуля. Выключить тумблер «высокое напряжение».
19. «Промыть» вакуумную распылительную камеру рабочим газом до остывания подложки, то есть после выключения разряда в течение 5 мин. не закрывать «НАТЕКАТЕЛЬ».
20. Закрыть «НАТЕКАТЕЛЬ», перекрыть трехходовой кран «НАПУСК РАБОЧЕГО ГАЗА» и кран «ДИФФУЗИОННЫЙ НАСОС». Дать подложкам окончательно остыть в течение 3-5 мин.
21. Переключить трехходовой кран на подачу воздуха, полностью открыть «НАТЕКАТЕЛЬ» и напустить воздух под колпак распылительной камеры.
22. Снять стеклянный колпак, установить его на специальном держателе и извлечь подложки.
23. Если необходимо продолжить напыление пленок на другие предварительно очищенные подложки, то:
  - необходимо их установить на подложкодержателе, закрыть распылительную

- камеру стеклянным колпаком и привести вакуумные краны в следующее положение: «НАТЕКАТЕЛЬ», «ДИФфуЗИОННЫЙ НАСОС», «ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС» - закрыты, и только после этого открыть кран «БАЙПАС»;
- перекрыть кран «НАПУСК РАБОЧЕГО ГАЗА», полностью открыть «НАТЕКАТЕЛЬ» и откачать газовую магистраль до давления  $10^{-1}$  мм.рт.ст. или 12 делений по шкале вакуумметра ВИТ-3;
  - перейти к п.9 и повторить последовательность работы на установке до п.22.
24. Порядок выключения установки магнетронного распыления.
- Непосредственно после извлечения подложки с пленкой из подложкодержателя положения вакуумных кранов должно быть следующее: трехходовой кран «НАПУСК РАБОЧЕГО ГАЗА» - открыт на атмосферу; «НАТЕКАТЕЛЬ» - полностью открыт, «ДИФфуЗИОННЫЙ НАСОС» и «БАЙПАС» - закрыты, «ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС» - открыт. В таком состоянии напылительная камера – разгерметизирована, оба насос – работают и форвакуумный насос – непрерывно откачивает диффузионный насос;
  - перекрыть трехходовой кран и выключить тумблер «диффузионный насос»;
  - через 25-30 мин. выключить тумблер «форвакуумный насос»;
  - закрыть воду;
  - Отключить установку от электросети.
25. Параллельно с остыванием диффузионного насоса произвести визуальный или под микроскопом (по заданию преподавателя) осмотр подложек с напыленными пленками. Результаты осмотра занести в таблицу 1.
26. В зависимости от задания преподавателя исследовать качество сцепления пленки металла с подложкой, используя ультразвуковой дезинтегратор UD-20 (режим и время обработки подложек ультразвуком уточнить у преподавателя). Результаты исследований занести в таблицу формы 2.

### ***Контрольные вопросы***

1. Приведите примеры использования тонких металлических пленок в технологии микроэлектроники.
2. Охарактеризуйте метод термического испарения в вакууме для целей получения тонких металлических пленок (возможности метода, область применения, преимущества и недостатки).
3. Охарактеризуйте метод термического испарения в вакууме с точки зрения динамики процесса (стадии процесса, влияние условий, наиболее благоприятный режим проведения процесса).
4. Охарактеризуйте наиболее благоприятный механизм роста пленок.
5. Охарактеризуйте аппаратное оформление установки термического испарения в вакууме (наиболее важные блоки установки, их назначение).
6. Зачем необходимо проводить термическую обработку пленок после ее нанесения?
7. Охарактеризуйте различные типы испарителей в составе установки вакуумного испарения (возможности, принцип действия, преимущества, недостатки).
8. Охарактеризуйте метод катодного распыления для целей получения тонких металлических пленок (возможности метода, область применения, преимущества и недостатки).



9. Охарактеризуйте метод катодного распыления с точки зрения динамики процесса (стадии процесса, влияние условий, наиболее благоприятный режим проведения процесса).
10. Охарактеризуйте аппаратное оформление установки катодного распыления (наиболее важные блоки установки, их назначение).
11. Под действие чего происходит распыление катода – мишени. Механизм ионизации рабочего газа. Критерии выбора рабочего газа.
12. Охарактеризуйте метод ионно-плазменного распыления для целей получения тонких металлических пленок (возможности метода, область применения, преимущества и недостатки).
13. Охарактеризуйте метод ионно-плазменного распыления с точки зрения динамики процесса (стадии процесса, влияние условий, наиболее благоприятный режим проведения процесса).
14. Охарактеризуйте аппаратное оформление установки ионно-плазменного распыления (наиболее важные блоки установки, их назначение).
15. Охарактеризуйте метод магнетронного распыления для целей получения тонких металлических пленок (возможности метода, область применения, преимущества и недостатки).
16. Охарактеризуйте метод магнетронного распыления с точки зрения динамики процесса (стадии процесса, влияние условий, наиболее благоприятный режим проведения процесса).
17. Охарактеризуйте аппаратное оформление установки магнетронного распыления (наиболее важные блоки установки, их назначение).

## Лабораторная работа 10 Фотолитография

### *Цель работы*

1. Изучить теоретические основы фотолитографического процесса.
2. Получить основные практические навыки работы на фотолитографическом оборудовании и с жидким (аэрозольным) фоторезистом.
3. Познакомиться и практически закрепить знания о последовательности обработки подложек при проведении фотолитографии.

### *Теоретические сведения*

В общем случае, литография - это процесс формирования в чувствительном слое, нанесенном на поверхность подложек, рельефного рисунка, повторяющего топологию полупроводниковых приборов или ИМС, и последующего переноса этого рисунка на подложки.

Чувствительным называется слой, который изменяет свои свойства (растворимость, химическую стойкость) под действием излучения внешних факторов (например, ультрафиолетового света или потока электронов и т.д.).

*Литографические процессы позволяют:*

- получать на поверхности окисленных полупроводниковых подложек свободные от слоя оксида области, задающие конфигурацию полупроводниковых приборов и элементов ИМС, в которые проводится локальная диффузия примесей для создания *p-n* переходов;
- формировать межсоединения элементов ИМС;
- создавать технологические маски из резистов, обеспечивающие избирательное маскирование при ионном легировании.

Широкое применение литографии обусловлено ее *следующими достоинствами:*

1. высокой воспроизводимостью результатов и гибкостью технологии, что позволяет легко переходить от одной топологии структур к другой сменой шаблонов;
2. высокой разрешающей способностью резистов;
3. универсальностью процессов, обеспечивающей их применение для самых разнообразных целей (травления, легирования, осаждения);
4. высокой производительностью, обусловленной групповыми методами обработки.

*Процесс литографии состоит из двух основных стадий:*

1. формирования необходимого рисунка элементов в слое чувствительного вещества (резиста), его эспонирования и проявления;
2. травления нижележащего технологического слоя (диэлектрика, металла) через сформированную топологическую маску или непосредственного использования слоя резиста в качестве топологической маски при ионном легировании.

В качестве диэлектрических слоев обычно служат пленки диоксида  $\text{SiO}_2$  и нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), а межсоединений - пленки некоторых металлов. При этом все пленки называют *технологическим слоем*.

В зависимости от длины волны используемого излучения различают следующие методы литографии:

1. фотолитографию (длина волны ультрафиолетового излучения  $\lambda = 150 - 440$  нм);
2. рентгенолитографию (длина волны рентгеновского излучения  $\lambda = 0,5 - 2$  нм);
3. электролитографию (поток электронов, имеющих энергию 10-100 КэВ или длину волны  $\lambda = 0,05$  нм);
4. ионолитографию (длина волны излучения ионов  $\lambda = 0,05 - 0,1$  нм).

*В зависимости от способа переноса изображения* методы литографии могут быть контактными и проекционными. В свою очередь, проекционные методы могут быть без изменения масштаба переносимого изображения ( $M 1:1$ ) и с уменьшением его

масштаба (М 10:1; М 5:1).

В зависимости от типа используемого резиста (негативный или позитивный) методы литографии по характеру переноса изображения делятся на негативные и позитивные.

Литография является прецизионным процессом, т. е. точность создаваемых рисунков элементов должна быть в пределах долей микрометра (0,3 - 0,5 мкм). Кроме того, различные методы литографии должны обеспечивать получение изображений необходимых размеров любой геометрической сложности, высокую воспроизводимость изображений в пределах полупроводниковых кристаллов и по рабочему полю подложек, а также низкий уровень дефектности слоя сформированных масок.

### *1. Контактная фотолитография*

*Фотолитография* - это сложный технологический процесс, основанный на использовании необратимых фотохимических явлений, происходящих в нанесенном на подложки слое фоторезиста при его обработке ультрафиолетовым излучением через маску (фотошаблон).

Технологический процесс фотолитографии можно разделить на три стадии:

1. формирование фоторезистивного слоя (обработка подложек с целью их очистки и повышения адгезионной способности, нанесение фоторезиста и его сушка);
2. формирование защитного рельефа в слое фоторезиста (совмещение, экспонирование, проявление и сушка слоя фоторезиста, вторая сушка (задубливание);
3. создание рельефного изображения на подложке (травление технологического слоя (пленок  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , металла), удаление слоя фоторезиста, контроль качества).

### *Позитивные и негативные фоторезисты*

Фоторезисты - это светочувствительные материалы с изменяющейся по действием света растворимостью, устойчивые к воздействию травителей и применяемые для переноса изображения на подложку.

Фоторезисты являются многокомпонентными мономерно-полимерными материалами, в состав которых входят: светочувствительные (поливинилциннаматы - в негативные фоторезисты и нафтохинондиазиды - в позитивные), пленкообразующие (чаще всего это различные фенолформальдегидные смолы, резольные и новолачные смолы) вещества, а также растворители (кетоны, ароматические углеводороды, спирты, диоксан, циклогексан, диметилформамид и др).

В процессе фотолитографии фоторезисты выполняют две функции: с одной стороны, являясь светочувствительными материалами, они позволяют создавать рельеф рисунка элементов, а с другой, обладая резистивными свойствами, защищают технологический слой при травлении.

В основе создания рельефа в пленке негативных фоторезистов лежит использование фотохимической реакции - фотополимеризации, а в пленке позитивных фоторезистов - реакции фоторазложения - фотолиза.

Для негативных фоторезистов освещенные при экспонировании участки не растворяются в проявителе и остаются на поверхности подложки. При этом рельеф представляет собой негативное изображение элементов фотошаблона. Для позитивных фоторезистов, соответственно все наоборот.

### *Нанесение слоя фоторезиста*

Перед нанесением слоя фоторезиста производят очистку поверхности пластины. Нанесенный на предварительно подготовленную поверхность подложек слой фоторезиста должен быть однородным по толщине и по всему их полю, без проколов, царапин (т. е. быть сплошным) и иметь хорошую адгезию.

Наносят слой фоторезиста на подложки в обеспыленной среде, соблюдая технологические режимы. Используемый фоторезист должен соответствовать паспортным данным. Перед использованием его необходимо профильтровать через специальные фильтры, а в особо ответственных случаях (при производстве БИС) обработать на центрифуге при частоте вращения 10 - 20 тыс. об/мин в течение нескольких часов. Это делают для того, чтобы удалить из фоторезиста инородные микрочастицы размером менее 1 мкм, которые могут привести к браку фоторезистивного слоя. Кроме того, необходимо проверить вязкость фоторезиста и довести ее до нормы.

Для нанесения слоя фоторезиста на подложки используют методы:

- 1) центрифугирования,
- 2) пульверизации,
- 3) электростатический,
- 4) окунания,
- 5) полива и, кроме того,
- 6) применяют накатку пленки сухого фоторезиста.

Методом центрифугирования наносят слои фоторезиста, толщина которых колеблется в пределах  $\pm 10\%$ . При вращении центрифуги с большой частотой происходит испарение растворителя, и вязкость фоторезиста быстро возрастает.

Толщина нанесенного слоя  $h_{сл}$  зависит от вязкости  $\nu$  фоторезиста и частоты вращения  $\omega$  столика центрифуги, т. е.  $H_{сл} = A\sqrt{\nu/w}$ , где  $A$  - коэффициент пропорциональности, определяемый опытным путем.

Используя метод центрифугирования, можно в зависимости от вязкости фоторезиста регулировать толщину его слоя от 0,4 до 3,5 мкм, изменяя частоту вращения центрифуги от 1500 до 8000 об/мин. При малых скоростях центрифугирования слой фоторезиста получается неровным и наблюдается его утолщение по краям подложки.

Выбирая толщину слоя фоторезиста, необходимо учитывать, что он должен обладать высокой разрешающей способностью (чем меньше толщина, тем выше разрешающая способность) и не терять стойкости к травителю. Кроме того, слой фоторезиста не должен иметь дефектов в виде проколов, количество которых с уменьшением толщины увеличивается. Следовательно, толщина слоя фоторезиста должна быть наименьшей, но достаточной для обеспечения его стойкости к травителю и обеспечивать малую дефектность.

Метод пульверизации основан на нанесении слоя фоторезиста в виде аэрозоля с помощью форсунки, действующей под давлением сжатого воздуха или инертного газа. Подложки располагаются на расстоянии в несколько сантиметров от форсунки, и фоторезист, осаждающийся в виде капель, покрывает их сплошным слоем. Метод пульверизации позволяет в автоматическом режиме вести групповую обработку подложек. При этом толщина слоя фоторезиста составляет от 0,3 до 20 мкм с точностью не хуже 5 %.

Достоинствами метода пульверизации являются:

- 1) возможность изменения толщины слоя фоторезиста в широких пределах;
- 2) однородность слоев по толщине;
- 3) отсутствие утолщений по краям подложек;

- 4) нанесение фоторезиста на профилированные подложки (в малейшие углубления и отверстия);
- 5) сравнительно малый расход фоторезиста;
- 6) высокая производительность и автоматизация процесса;
- 7) хорошая адгезия слоя к подложкам (лучшая, чем при центрифугировании).

Недостатки этого метода состоят в том, что при его использовании необходимо специально подбирать растворители, так как слой фоторезиста не должен стекать по подложкам. Кроме того, следует тщательно очищать фоторезист и используемый для пульверизации газ.

При электростатическом методе слой фоторезиста наносят на подложки в электрическом поле напряженностью 1 - 5 кВ/см. Для создания такого поля между подложкой и специальным кольцевым электродом подают постоянное напряжение 20 кВ. При впрыскивании фоторезиста форсункой в пространство между электродом и подложкой капельки фоторезиста диаметром в несколько микрометров заряжаются и летят под действием электрического поля к пластине. Этот метод имеет высокую производительность и позволяет наносить слой фоторезиста на подложки большой площади. Недостаток его - трудность стабилизации процесса и относительная сложность оборудования.

Методы окунания и полива являются простейшими среди всех методов нанесения слоя фоторезиста. При окунании подложки ее погружают на несколько секунд в ванну с фоторезистом, а затем с постоянной скоростью вытягивают из нее в вертикальном положении специальными подъемными устройствами и сушат, установив вертикально или наклонно. Полив фоторезиста на горизонтально расположенные подложки обеспечивает лучшую по сравнению с окунанием однородность слоя по толщине. Следует отметить, что при этом методе неизбежны утолщения слоя фоторезиста по краям. Окунание и полив применяют для нанесения слоя фоторезиста на подложки больших размеров, а также для получения его толстых слоев (до 20 мкм) на обеих сторонах подложки.

Общим недостатком нанесения жидких фоторезистов является трудность получения сплошных слоев заданной толщины.

Накатка пленки сухого фоторезиста значительно упрощает процесс и обеспечивает получение равномерного покрытия на подложках большой площади. Пленочный фоторезист представляет собой трехслойную ленту, в которой слой фоторезиста заключен между двумя полимерными пленками: одна (более прочная) является несущей, а другая - защитной.

Предварительно защитную пленку удаляют, а фоторезист вместе с несущей пленкой накатывают валиком на подложки, нагретые до 100 °С. Под действием температуры и давления фоторезист приклеивается к подложке. При этом его адгезия к подложке должна быть выше, чем к несущей пленке, которую затем снимают.

Недостатки этого метода - большая толщина (10-20 мкм) и низкая разрешающая способность слоя сухого фоторезиста. Поэтому накатку пленки сухого фоторезиста используют только при больших размерах элементов ИМС или при изготовлении печатных плат.

### *Сушка фоторезиста*

Для окончательного удаления растворителя из слоя фоторезиста его просушивают. При этом уплотняется молекулярная структура слоя, уменьшаются внутренние напряжения, и повышается адгезия к подложке. Неполное удаление растворителя из слоя фоторезиста снижает его кислотостойкость. Для удаления

растворителя подложки нагревают до температуры, примерно равной 100°C. Время сушки выбирают оптимальным для конкретных типов фоторезистов.

Существует три метода сушки фоторезиста:

- конвекционный,
- инфракрасный,
- посредством СВЧ-поля.

При конвективной сушке подложки выдерживают в термокамере при 90-100°C в течение 15—30 мин. Недостаток этого метода - низкое качество получаемого фоторезистивного слоя.

При инфракрасной сушке источником теплоты является сама полупроводниковая подложка, поглощающая ИК-излучение от специальной лампы или спирали накаливания. Окружающая среда (очищенный и осушенный инертный газ или воздух) при этом сохраняет благодаря непрерывной продувке примерно комнатную температуру. При данном механизме сушки время сокращается до 5 - 10 мин.

При СВЧ-сушке подложки нагреваются, поглощая электромагнитную энергию СВЧ-поля. Такая сушка производится в печах мощностью 200 - 400 Вт при рабочей частоте 2,45 ГГц. Время сушки - несколько секунд. Достоинством этого метода является высокая производительность, а недостатками - сложность оборудования и необходимость тщательного экранирования рабочего объема во избежание облучения оператора, а также неравномерность сушки слоя фоторезиста на различных по электрическим характеристикам участках подложек. Поэтому сушке в СВЧ-поле подвергают только однородные подложки. Высушенный слой необходимо экспонировать не позднее чем через 10 ч.

### *Совмещение и экспонирование*

Совмещение и экспонирование являются наиболее ответственными операциями процесса фотолитографии. Точность полученного в процессе фотолитографии топологического рисунка в первую очередь определяется прецизионностью процесса совмещения.

Передача изображения с фотошаблона на подложку должна выполняться с точностью до десятых долей минимального размера элемента, поэтому процессы совмещения и экспонирования проводят на одном рабочем месте одновременно на одной установке, не допуская даже малой вибрации фотошаблона и подложки.

Перед экспонированием слоя фоторезиста фотошаблон следует правильно сориентировать относительно подложки и рисунка предыдущего слоя. Для полного формирования структуры полупроводникового прибора или ИМС необходим комплект фотошаблонов со строго согласованными топологическими рисунками элементов.

При первой фотолитографии, когда поверхность подложек еще однородна, фотошаблон ориентируют относительно базового среза подложки. При последующих фотолитографиях, когда на подложках сформированы топологические слои, рисунок фотошаблона ориентируют относительно рисунка предыдущего слоя.

Совмещают рисунки фотошаблона и подложки в два этапа. На первом этапе с помощью реперных модулей - "пустых кристаллов" выполняют грубое совмещение в пределах всего поля подложки. На втором этапе с помощью микроскопа в пределах единичного модуля по специальным знакам - фигурам совмещения, предусмотренным в рисунке каждого топологического слоя, выполняют точное совмещение. Форму фигур совмещения (кресты, круги, квадраты) выбирают в зависимости от типа используемого при фотолитографии фоторезиста.

Сложность операции совмещения состоит в том, что приходится с высокой точностью совмещать элементы малых размеров на большой площади. Для этого увеличение микроскопа должно быть не менее 200 раз.

Существует два метода совмещения фотошаблонов с подложками: *визуальный*, при котором, выполняя совмещение, наблюдают за контрольными отметками в микроскоп (при этом точность совмещения составляет 0,25-1 мкм и зависит от возможностей установки) и *автоматизированный фотоэлектрический* с помощью фотоэлектронного микроскопа, обеспечивающий точность совмещения 0,1-0,3 мкм.

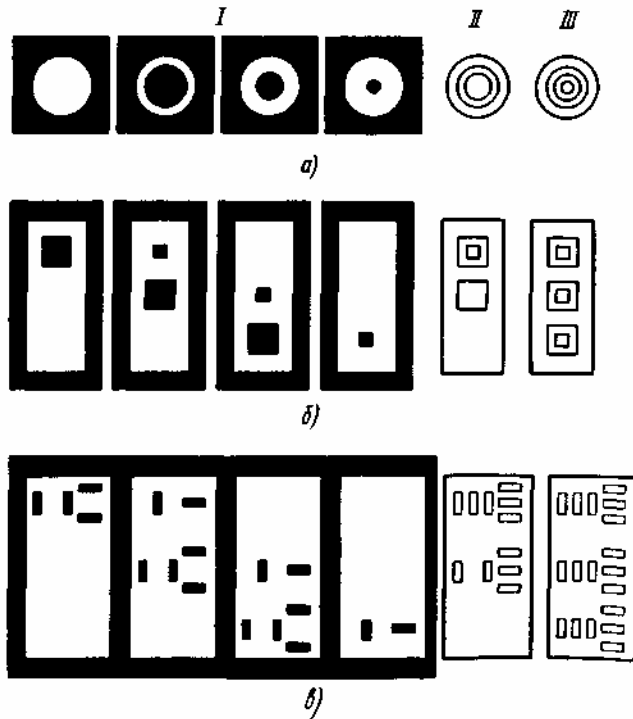


Рис. 1. Фигуры совмещения на фотошаблонах (I) и подложках после второй (II) и четвертой (III) фотолитографии:  
а - концентрические окружности,  
б - вложенные квадраты,  
в- бисекторные знаки

Современные установки совмещения и экспонирования представляют собой сложные оптико-механические комплексы. Точность совмещения и производительность зависят от выбранного метода совмещения - визуального или фотоэлектрического.

Как уже отмечалось, совмещение и экспонирование выполняют на одной установке (рис.2), при этом подложка 9 с помощью подающей кассеты 1 перемещается по конвейеру 2 в устройство совмещения 3, где точно ориентируется относительно фотошаблона 4 при наблюдении в микроскоп 5.

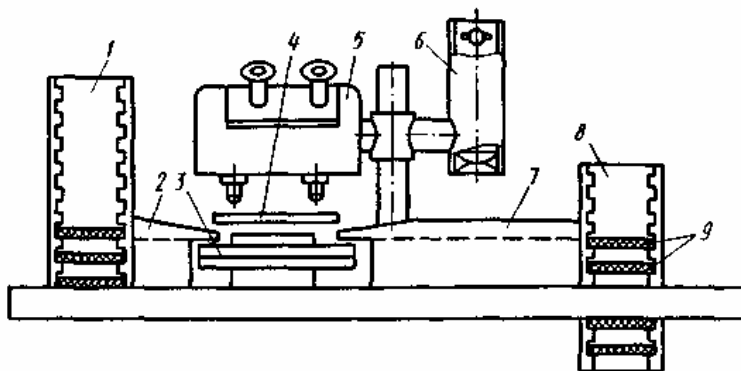


Рис.2. Установка совмещения и контактного экспонирования:  
1, 8 - подающая и приемная кассеты, 2, 7 - конвейеры,  
3- устройство совмещения,  
4- фотошаблон, 5- микроскоп,  
6 - осветитель, 9 – подложки.

После совмещения микроскоп автоматически отводится в сторону, на его место устанавливается осветитель 6 и проводится экспонирование. Затем подложка подается в приемную кассету 8 и по конвейеру 7 перемещается на операцию проявления.

В качестве источника света обычно применяют ртутно-кварцевую лампу высокого давления ДРШ-350 или ДРШ-500, создающую мощный световой поток. Излучение такой лампы лежит в основном в ультрафиолетовой области спектра (330-440 нм).

Важным оптическим эффектом при экспонировании является прохождение ультрафиолетового излучения через пленку фоторезиста. Световой поток, проходя через слой фоторезиста, рассеивается в нем, а, достигая подложки, отражается от нее и возвращается обратно в слой фоторезиста. Дойдя до поверхности фотошаблона, световой поток отражается под углом от его металлизированных непрозрачных участков и через прозрачные участки попадает в слой фоторезиста на подложке. Эти отражения светового потока приводят к нежелательному дополнительному экспонированию участков слоя фоторезиста, находящегося под непрозрачными участками фотошаблона. Интенсивность отраженного потока света зависит от коэффициентов отражения подложки и фотошаблона. Для снижения эффекта отражения при контактной фотолитографии используют цветные оксидные фотошаблоны, имеющие малый коэффициент отражения.

### *Проявление слоя фоторезиста*

Проявление заключается в удалении в зависимости от использованного типа фоторезиста экспонированных или неэкспонированных участков, в результате чего на поверхности подложек остается защитный рельеф - фоторезистивная маска требуемой конфигурации.

Проявителями для негативных фоторезистов служат органические растворители: толуол, бензол, уайт-спирит, трихлорэтилен, хлорбензол и др.

Для проявления позитивных фоторезистов используют слабые водные и водно-глицериновые растворы щелочей: 0,3-0,6 %-ный раствор КОН, 1-2 %-ный раствор тринатрийфосфата.

При проявлении негативных фоторезистов основными факторами являются полнота реакции полимеризации фоторезиста при экспонировании, и тип проявителя, а позитивных - концентрация проявителя и время проявления.

Кроме того, важным фактором при проявлении фоторезистов является значение pH и температура проявителя. При изменении pH всего на десятую долю процента размер элемента рельефного рисунка может измениться на 10%. С ростом температуры скорость проявления (скорость растворения фоторезиста в проявителе) растет, и размеры проявленных участков увеличиваются.

Типовое время проявления отечественных позитивных фоторезистов 30-40 с, что позволяет согласовывать работу отдельных блоков линий фотолитографии и контролировать процесс проявления с большой точностью.

Механизм проявления негативных фоторезистов основан на следующих процессах:

- диффузии молекул проявителя к экспонированным и неэкспонированным участкам слоя фоторезиста;
- набухании неэкспонированных участков и частично экспонированных участков слоя фоторезиста;
- растворении экспонированных участков и переходе молекул полимера в объем проявителя;
- формировании рельефа элементов рисунка;
- удалении остатков фоторезиста с неэкспонированных участков;
- испарении проявителя из объема экспонированных участков фоторезиста и восстановлении первоначальных геометрических размеров элементов рисунка.

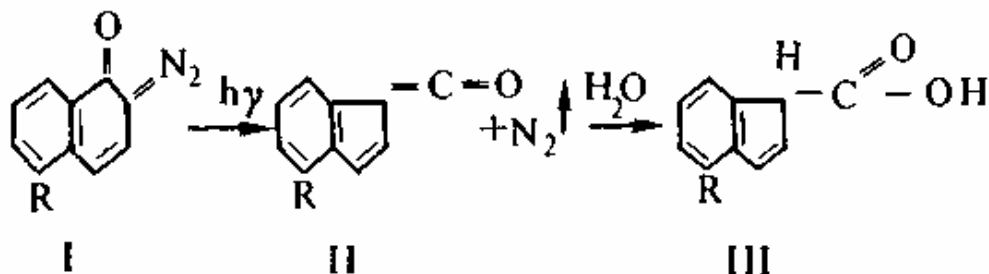


Проявитель для негативных фоторезистов должен обладать, с одной стороны, хорошей растворяющей способностью по отношению к исходному полимерному материалу фоторезиста, а с другой стороны, минимальным воздействием на экспонированные участки слоя. Кроме того, проявитель должен вызывать минимальное набухание экспонированных участков и, следовательно, наименьшие искажения геометрических размеров элементов рисунков. Набухание экспонированных участков в основном зависит от количества поперечных связей и свойств молекул сшитого полимера.

При недостаточной экспозиции облученные участки будут либо полностью растворяться, либо набухать до такой степени, что слой фоторезиста может оторваться от поверхности подложки или настолько увеличиться в объеме, что соседние элементы рисунка соединятся между собой. Поэтому правильность выбора проявителя для негативных фоторезистов зависит не только от необходимости получения минимальных размеров элементов рисунка, но и от степени набухания экспонированных участков.

Негативные фоторезисты проявляют *пульверизацией или поливом*. Эти методы обеспечивают чистоту процесса, хорошее удаление продуктов реакции и высокую производительность, а также возможность объединения в едином цикле на одной установке операций проявления, промывки и сушки на центрифуге.

Механизм проявления позитивных фоторезистов заключается в образовании при химической реакции растворимых соединений, которые вымываются при проявлении. Структурная схема такой реакции приведена ниже:



При облучении ортонафтохинондиазид (I), входящий в состав фоторезиста, расщепляется, в результате чего образуется инденкентен (II), который интенсивно поглощает воду с образованием инденкарбоновой кислоты (III). Наличием группы -COOH в инденкарбоновой кислоте определяется выбор растворов, пригодных для проявления (щелочи, аммиак и др.), с которыми эта кислота образует легко растворимые в воде соли, вымываемые при проявлении. Раствор при проявлении позитивных фоторезистов обычно окрашивается в фиолетово-коричневый цвет.

#### *Сушка проявленного рельефа (задубливание)*

Сушка проявленных участков слоя фоторезиста - обеспечивает изменение в слое фоторезиста его структуры в результате полимеризации. Вследствие этого повышается стойкость слоя фоторезиста к действию травителей и улучшается его адгезия к подложке.

Задубливание слоя фоторезиста является второй сушкой и отличается от первой, выполняемой после его нанесения, более высокой температурой. При повышенных температурах происходит пластическая деформация слоя фоторезиста: в зависимости от термопластичности входящей в его состав полимерной основы затягиваются мелкие отверстия, поры и дефекты.

Так, температура сушки негативных фоторезистов на основе поливинилциннамата составляет 200-220°C при времени выдержки до 1 ч. При более высоких температурах даже кратковременная сушка вызывает термическое разрушение слоя фоторезиста: он приобретает коричневую окраску, поверхность

покрывается мелкими трещинами и рельеф полностью теряет защитные свойства.

С ростом температуры сушки позитивных фоторезистов на основе нафтохинондиазида и каучуков улучшается их адгезия к подложке и увеличивается пластическая деформация. Например, сушка при 200-240 °С в течение 30 мин значительно улучшает стойкость фоторезистивной маски к травлению, особенно при фотолитографии на фосфорно-силикатном стекле, к которому фоторезисты обычно имеют плохую адгезию.

#### *Травление технологических слоев через маску фоторезиста*

Заключительным этапом процесса фотолитографии является формирование топологии рельефного рисунка на подложках в технологическом слое (маскирующей, изолирующей, защитной диэлектрической или проводящей металлической пленке) травлением с последующим удалением слоя фоторезиста и очисткой подложек. Эти операции осуществляют химическим жидкостным или плазменным "сухим" травлением.

#### *Удаление слоя фоторезиста*

Для удаления фоторезистивной маски подложки обрабатывают в горячих органических растворителях (диметилформамиде, метилэтилкетоне, моноэтанолаmine и др.). При этом слой фоторезиста разбухает и вымывается. Скорость и чистота удаления фоторезиста зависят от степени его задубливания при второй термообработке.

При высоких температурах задубливания (более 140-150°С) в слое фоторезиста происходят термореактивные превращения, в результате которых он теряет способность растворяться в органических растворителях. В этом случае подложки два-три раза кипятят по 5-10 мин в концентрированной серной, азотной кислоте или смеси Каро (серная кислота и перекись водорода). Слой фоторезиста при этом разлагается и растворяется в кислоте, а затем его окончательно удаляют в органическом растворителе. Кислотное удаление фоторезиста нельзя применять при фотолитографии по металлу.

Некоторые фоторезисты хорошо удаляются в водных растворах поверхностно-активных веществ, например кипячением 5-10 мин в 30 %-м растворе синтанола.

Интенсивность удаления слоя фоторезиста можно увеличить ультразвуковым воздействием. Для этого ванночку с подложками, заполненную реагентом, помещают в ультразвуковую ванну. Время обработки при этом уменьшается в 10 - 20 раз.

Для удаления позитивных фоторезистов, температура сушки которых не превышала 95°С, подложки предварительно облучают ультрафиолетовым светом. При этом ортонафтохинондиазида превращаются в инденкарбоновые кислоты, которые легко удаляются в органических растворителях.

После химического удаления слоя фоторезиста подложки тщательно очищают от его остатков, которые могут отрицательно сказаться на таких последующих технологических операциях, как диффузия, окисление, нанесение металлизации и др. Кроме того, необходимо качественно очищать поверхность подложек от загрязнений, вносимых при фотолитографии.

Химическую обработку проводят на установках, входящих в комплекс универсального оборудования, предназначенного для очистки подложек. Все эти операции проводят во фторопластовых ваннах, снабженных нагревателями и эжекторами для откачки реагентов после окончания технологического процесса.

Удаление фоторезиста можно проводить и плазмохимическим методом.

## *II. Особенности проекционной фотолитографии*

При проекционной литографии изображение с фотошаблона переносится (проецируется) на полупроводниковую подложку с помощью оптических систем - проекционных объективов. Разрешающая способность проекционной фотолитографии 0,6 - 0,8 мкм.

Метод проекционной фотолитографии имеет несколько вариантов, которые отличаются масштабами переноса изображения и способами заполнения рабочего поля подложки.

Так, при масштабе 1:1 изображение с фотошаблона переносится с помощью проекционной системы на подложку без изменения размеров элементов. Экспонирование может осуществляться сразу всего рабочего поля подложки или последовательным его сканированием.

При проекционной фотолитографии с уменьшением масштаба (обычно 10:1 или 5:1) единичное изображение переносится с фотошаблона на рабочее поле подложки последовательной мультипликацией.

При проекционной фотолитографии, как и при контактной, необходимо точно совмещать фотошаблон с подложкой, для чего служат специальные фигуры - *метки совмещения*.

### *Оптические эффекты при фотолитографии*

При переносе изображения с фотошаблона на слой фоторезиста дифракция на краях маски фотошаблона вызывает искажение элементов рисунка, формируемого на слое фоторезиста. Известно, что свет, обладая волновой природой, претерпевает дифракционное перераспределение на освещаемом объекте. При этом следует учитывать, что между фотошаблоном и подложкой даже при контакте всегда имеется некоторый зазор, обусловленный их взаимной неплоскостностью. Необходимо также принимать в расчет толщину слоя фоторезиста, так как при воспроизведении элементов малых размеров она становится соизмерима с ними.

### **Описание лабораторного оборудования**

Для изучения фотолитографического процесса используется следующее оборудование и материалы:

1. Набор химических реактивов и растворителей, расположенных на специальной стойке в лаборатории или под тягой:

- очистка подложек осуществляется по методике и с использованием реактивов, описанных в предыдущей лабораторной работе;

- в работе используется промышленный позитивный фоторезист (конкретная марка фоторезиста уточняется у преподавателя);

- в качестве проявителя используется 1% раствор щелочи (NaOH или KOH);

- в качестве травителя технологического слоя в случае меди используется азотная кислота ( $\text{HNO}_3$ ), а в случае алюминия – раствор щелочи (NaOH или KOH);

- полимерную пленку отработанного фоторезиста удаляют в концентрированной азотной кислоте.

2. Стандартный набор лабораторной посуды для отмывки подложек и проведения хим. обработки подложек.

3. Установка нанесения фоторезиста методом центрифугирования (рис.3).

4. Установка экспонирования (рис.4).

5. Набор сменных фотошаблонов (масок).

6. Оптический микроскоп.

7. Секундомер.

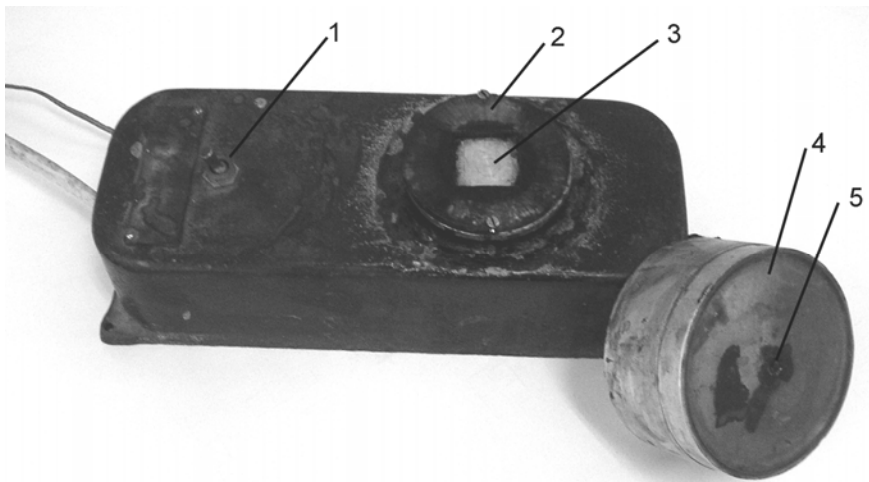


Рис.3. Центрифуга для нанесения жидкого фоторезиста на подложку:  
1- тумблер включения, 2- диск центрифуги, 3- место для подложки; 4- защитный кожух; 5- отверстие для подачи резиста.

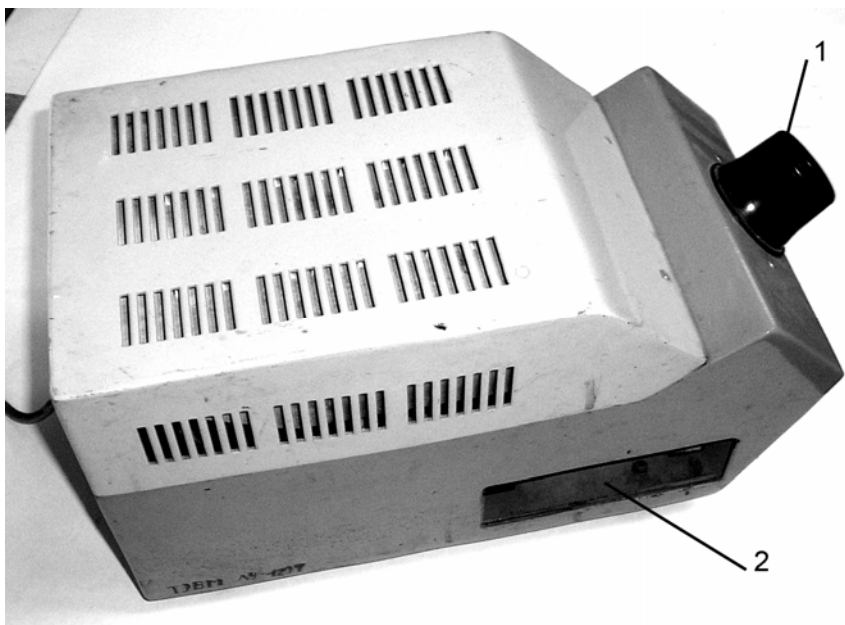


Рис. 4. Установка экспонирования УФ:  
1- смотровое окно; 2- бункер для загрузки подложек с неэкспонированным фоторезистом.

### ***Требования к отчету***

*Отчет должен содержать:*

1. титульный лист;
2. цель работы;
3. краткие сведения по этапам литографического процесса;
4. выводы по работе, отражающие наиболее возможные причины брака;
5. к отчету должны быть приложены образцы обработанных пластин.

### ***Лабораторное задание***

*Домашняя работа:*

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Выполнить пункты 1-3 требований к отчету.
3. Изучить теоретические сведения.
4. Подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

*Работа в лаборатории:*

1. Провести последовательность операций литографического процесса и получить на подложке топологию металлической пленки, заданной шаблоном.
2. Проанализировать полученные образцы и выявить наиболее возможные причины возникновения брака.

### **Порядок выполнения работы**

*В зависимости от задания преподавателя работа может выполняться в несколько этапов.*

1. Получить у преподавателя необходимое количество образцов, либо чистых подложек, либо с уже нанесенными тонкими металлическими пленками алюминия и (или) меди.
2. В случае получения образцов без металлических пленок их необходимо очистить и нанести на них пленки алюминия и (или) меди (по заданию преподавателя). При этом использовать методику лабораторной работы «Технологии получения тонких металлических пленок». Метод получения тонких пленок (вакуумное испарения или магнетронное распыление) также уточняется у преподавателя.
3. Нанести на слой металла фоторезист методом центрифугирования на установке, показанной на рис. 3. Для этого необходимо:
  - получить у лаборанта емкость с промышленным фоторезистом и дозатор для его дозированного использования (в простейшем случае это может быть пипетка);
  - снять защитный кожух с центрифуги;
  - установить подложку на диск центрифуги металлической пленкой вверх и зафиксировать подложку в центре диска центрифуги (ВНИМАНИЕ! Не рекомендуется касаться рабочей поверхности подложки руками);
  - установить защитный кожух центрифуги так, чтобы вращающийся диск центрифуги не касался защитного кожуха;
  - включить тумблер центрифуги и дождаться выхода ее на рабочий режим (10-15 сек);
  - осторожно дозатором впрыснуть 2-3 капли фоторезиста в центральное отверстие защитного кожуха центрифуги;
  - далее после 10-15 секунд включить тумблер центрифуги и дождаться ее полной остановки;
  - снять защитный кожух центрифуги и визуально убедиться в том, что фоторезист равномерно распределился по всей поверхности подложки (в противном случае подложка с фоторезистом бракуется и поступает на операцию исправления брака: весь фоторезист снимается с подложки растворителем и повторяется операция его нанесения до равномерного покрытия им всей плоскости подложки);
  - после успешного нанесения фоторезиста подложки подвергают сушке в два этапа: первый - при затемнении при комнатной температуре в течение 10-15 минут; второй этап – в сушильном шкафу при температуре  $90 \pm 10$  °С в течение 20-30 минут (более точно режим сушки уточняется в зависимости от конкретной марки фоторезиста).
4. Провести операцию экспонирования слоя фоторезиста – для этих целей:
  - разместить подложку со слоем фоторезиста в установку экспонирования (рис.4) так, чтобы слой резиста был сверху;
  - осторожно, не царапая пленку фоторезиста наложить шаблон на подложку;
  - включить установку экспонирования, при этом в смотровом окне можно будет наблюдать излучение ртутной лампы;
  - проводить экспонирование, то есть засветку фоторезиста строго определенное время (время экспонирования определяется мощностью светового потока в временем, поскольку освещенность в нашем случае есть величина постоянная, то оптимальная экспозиция будет зависеть только от времени, которое подбирается экспериментально и может изменяться от нескольких секунд до нескольких минут; рекомендуемое время экспонирования – 3 мин;

- по окончании операции экспонирования выключить установку экспонирования, снять шаблон с подложки и осторожно (пинцетом) извлечь подложку из установки.

5. Далее экспонированные образцы подвергаются химической обработке – проявлению, цель которой – удаление ненужных участков фоторезистивного слоя и формирование топологии маски на поверхности подложки – для этих целей:

- поместить подложку в ванночку с проявителем и визуально наблюдать процесс проявления до четкого формирования на подложке топологии рельефа (для проявления позитивного фоторезиста использовать 1% раствор NaOH или KOH, либо 2% раствор  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ; для проявления негативного фоторезиста использовать – трихлорэтилен; процесс ведется при комнатной температуре);

- по окончании проявления подложки промыть в дистиллированной воде и приступить к операции задубливания.

6. Провести операцию второй сушки (задубливание) – для этих целей:

- поместить подложки в сушильный шкаф на фильтровальной бумаге;

- провести задубливание (выдерживание обработанных подложек в сушильном шкафу) в течение 30 минут при температуре 150-180 °С (цель задубливания – закрепление оставшегося на подложке фоторезиста и придание ему резистивных свойств, то есть устойчивости к травителям);

- далее осторожно извлечь подложки из сушильного шкафа, в течение 3-5 минут дать им остыть до комнатной температуры и далее приступить к операции травления технологического слоя на подложке.

7. Провести операцию травления технологического слоя (в данном случае металлической пленки) через резистивную маску; для этих целей выполнить следующее:

- подготовить ванночку для травления, заполнив ее соответствующим травителем (для пленок меди использовать азотную кислоту, а для травления алюминия – 25% раствор NaOH);

- осторожно пластиковым пинцетом перенести подложки в травитель и визуально наблюдать процесс травления (среднее время травления не должно превышать несколько минут);

- после окончания процесса травления промыть подложки в дистиллированной воде.

8. Выполнить заключительную операцию литографического процесса – удаление пленки фоторезиста, для этих целей выполнить следующие действия:

- подготовить контейнер для удаления пленки фоторезиста, заполнив его концентрированной серной кислотой (ВНИМАНИЕ! Все операции с кислотами выполнять только под тягой с использованием пластикового пинцета);

- поместить обрабатываемые подложки в контейнер с серной кислотой;

- визуально наблюдать процесс удаления пленки фоторезиста (среднее время удаления полимерной пленки фоторезиста 1-1,5 мин);

- после полного удаления слоя фоторезиста подложки промыть в дистиллированной воде.

9. Высушить подложки фильтровальной бумагой или при необходимости в сушильном шкафу при температуре 80-85 °С.

10. Произвести визуальный осмотр полученной топологии металлической пленки на подложке, сделать необходимые выводы о возможных причинах брака.

### ***Контрольные вопросы***

1. Дайте определение следующих терминов: литография, чувствительный слой, фотолитография, светочувствительный слой, технологический слой, контактная фотолитография, проекционная фотолитография, фотошаблон.
2. Что позволяют литографические процессы в рамках планарно-эпитаксиальной технологии
3. Перечислите основные достоинства литографических процессов.
4. Предложите классификационный признак (признаки) и классифицируйте литографические процессы, согласно этих классификационных признаков.
5. Объясните основные функции, выполняемые фоторезистом.
6. Поясните разницу между позитивным и негативным фоторезистом.
7. Что такое сухой пленочный фоторезист?
8. Охарактеризуйте технологическую операцию нанесения слоя фоторезиста (назначение, возможности, виды технической реализации, преимущества и недостатки различных видов нанесения жидких (аэрозольных) фоторезистов).
9. Охарактеризуйте технологическую операцию сушки фоторезистивного слоя (назначение, возможности, виды технической реализации, преимущества и недостатки различных видов сушки). Что такое задубливание?
10. Охарактеризуйте технологическую операцию совмещения и экспонирования в цикле литографической обработки поверхности подложек (назначение, возможности, виды технической реализации).
11. Охарактеризуйте технологическую операцию проявления слоя фоторезиста (назначение, возможности, виды технической реализации).
12. Охарактеризуйте химизм и механизм технологической операции проявления негативного фоторезиста.
13. Охарактеризуйте химизм и механизм технологической операции проявления позитивного фоторезиста.
14. Охарактеризуйте технологическую операцию удаления резистивной маски (назначение, цель, возможности, виды технической реализации).
15. Охарактеризуйте основные причины и виды брака при реализации литографического процесса.

# Лабораторная работа 11

## Изучение технологии изготовления МДП интегральных микросхем

### *Цель работы*

1. Изучить технологический процесс (последовательность операций) изготовления интегральных микросхем на МДП - транзисторах.
2. Изучить технологические операции изготовления МДП ИМС.
3. Ознакомиться с технологией КМДП ИМС на различных стадиях технологического процесса.
4. Ознакомиться с материалами, применяемыми при изготовлении МДП ИМС.
5. Произвести оптические измерения конструктивных параметров МДП- структур.

### *Теоретические сведения*

В настоящее время область применения МДП ИМС непрерывно расширяется. Этот процесс сопровождается разработкой и внедрением новых технологических операций и приемов при производстве МДП ИМС. Приведем разновидности МДП - структур, применяемые в МДП ИМС.

МДП - структуры могут создаваться на подложках (кремниевых пластинах)  $n$ - ,  $p$ - типа. По электропроводности канала различают:  $p$  - каналные МДП структуры и  $n$  - каналные МДП структуры. Комплементарные МДП структуры содержат одновременно  $n$  - каналные и  $p$  - каналные МДП транзисторы на одной кремниевой подложке (пластине). Сокращенно эти структуры называют  $p$  - МДП,  $n$  - МДП и КМДП соответственно, а технологические процессы их изготовления -  $p$  - МДП,  $n$  - МДП и КМДП процессы в подложках  $n$ - или  $p$ - типов.

По способу получения области канала различают: МДП - структуры с индуцированным каналом, когда он наводится под областью затвора при напряжении на затворе больше порогового; МДП структуры с встроенным каналом, когда в тонком приповерхностном слое полупроводника канал создается легированием той же примесью, что сток исток; диффузионные МДП структуры (сокращенно ДМДП ), когда канал и исток создаются методом двойной диффузии в одну область пластины; объемные  $V$  - МДП структуры отличаются тем, что канал размещается не на поверхности пластины, а в ее объеме под областью стока. В свою очередь МДП - структуры с индуцированным каналом разделяют на структуры с поверхностным каналом и структуры с углубленным каналом. В структурах с поверхностным каналом область канала МДП транзистора создается дополнительным легированием (подгонкой) примесью, совпадающей по типу проводимости с материалом подложки или типом проводимости кармана в подложке. В таких структурах подгонка приводит к повышению концентрации примеси и увеличению (по абсолютной величине) порогового напряжения транзистора в сравнении с концентрацией и пороговым напряжением МДП транзистора в подложке или в кармане в подложке. В структурах с углубленным каналом приповерхностная область канала легируется примесью, тип проводимости которой противоположен проводимости подложки или кармана в подложке. В результате в приповерхностной области канала образуется  $p$ - $n$  переход, который полностью перекрывается областью обеднения, созданной поверхностным потенциалом затвора транзистора. В структурах с углубленным каналом подгонка приводит к уменьшению (по абсолютной величине) порогового напряжения транзистора в сравнении пороговым напряжением МДП транзистора в подложке или в кармане в подложки.

По материалу затвора различают МДП – структуры:



- с алюминиевым затвором,
- молибденовым,
- поликремниевым.

По способу изоляции элементов различают МДП - структуры с обратным смещенным р-п переходом и МДП структуры с диэлектрической изоляцией.

По характеристическому размеру (норме проектирования) МДП структуры разделяют на структуры, выполненные с нормой проектирования, например, 5.0 мкм, 2.0 мкм, 1.2 мкм, 0,8 мкм, 0.6 мкм, 0.35 мкм, 0.25 мкм. Как правило, характеристический размер совпадает с минимальной длиной канала МДП транзисторов.

МДП - структуры разделяют по количеству проводящих слоев и их назначению. Например, в МДП - процессе с двумя слоями поликремния в первом уровне поликристаллического кремния могут выполняться нижние обкладки конденсатора, а во втором – затворы транзисторов и верхние обкладки конденсатора. Для разводки и коммутации МДП - структур могут использоваться один, два, три, пять или шесть слоев металла.

МДП - структуры разделяют также по величине рабочего напряжения, соответственно, на структуры с напряжением 40В, 25В, 15В, 9В, 5В, 3В, 1,5В.

Название технологии изготовления МДП - структур включает:

- тип МДП структуры: n-МДП, p-МДП, КМДП;
- уровень проектных норм (характеристический размер);
- тип проводимости материала подложки, для КМДП структур - тип проводимости кармана в подложке;
- материал затвора;
- количество и материал слоев коммутации и разводки;
- рабочее напряжение МДП структур;
- вид изоляции элементов.

В данной лабораторной работе будут рассмотрены две технологии изготовления:

1. 5,0 мкм КМДП с р-карманом, с алюминиевыми затворами и изоляцией обратным смещенным р-п переходом на кремниевой подложке n – типа, рабочее напряжение 9В, маршрутная карта которой приведена в таблице 11.

*Краткая характеристика процесса:*

- КМДП процесс;
  - характеристический размер 5,0 мкм;
  - подложка n-типа с р-карманом;
  - алюминиевый затвор;
  - изоляция активных элементов обратным смещенным р-п переходом;
  - затворный диэлектрик – окись кремния толщиной 800 Å;
  - n-МДП транзистор с поверхностным каналом, p-МДП транзистор с углубленным каналом;
  - межслойная изоляция металл/подложка, металл/n+, металл/p+ - окись кремния;
  - коммутация и разводка – один уровень металла из слоя алюминия;
  - пассивация слоем ФСС ( фосфорно – силикатное стекло);
  - рабочее напряжение 9 В.
2. КМДП с поликремниевыми затворами и диэлектрической изоляцией на кремниевой подложке p – типа, маршрутная карта которой сведена в таблице 12.

*Краткая характеристика процесса:*

- КМДП процесс;
- характеристический размер 1,5 мкм;

- подложка p-типа с n-карманом;
- затвор из поликристаллического кремния;
- изоляция активных элементов LOCOS;
- затворный диэлектрик – окись кремния толщиной 300 Å;
- n-МДП транзистор с поверхностным каналом, p-МДП транзистор с углубленным каналом;
- межслойная изоляция металл/подложка, металл/n+, металл/p+ - окись кремния и ФСС;
- коммутация и разводка – один уровень поликремния, один уровень металла из слоя алюминия с кремнием;
- пассивация слоем оксинитрида кремния;
- рабочее напряжение 3В.

*Технология изготовления МДП - структур с алюминиевым затвором и изоляцией p-n переходом*

В таблице 1 представлена маршрутная карта КМДП с алюминиевым затвором и изоляцией обратным смещенным p-n переходом на кремниевой подложке n – типа. На рисунке 1 показано поперечное сечение структур МДП транзисторов n- и p- типа, на рисунке 2 – электрическая схема и топология КМДП инвертора, спроектированного по этому технологическому процессу.

Таблица 1.

Маршрутная карта КМДП с алюминиевым затвором и изоляцией обратным смещенным p-n переходом на кремниевой подложке n – типа.

№	Наименование операции	Режимы, реактивы	Параметры слоев, пластин
1	Составление и маркировка партии пластин		КЭФ 4,5 <100>
2	Окисление	T=950°C, в атмосфере O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	d <sub>x</sub> = 0,036 мкм
3	<b>Фотолитография 1.</b> Вскрытие окон в фоторезисте под p-карманы		
4	Ионное легирование бором. Формирование p – карманов.	E = 60 кэВ D = 0,65 мкКл/см <sup>2</sup>	
5	Удаление фоторезиста	«КАРО»	
6	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
7	Термообработка карманов ( разгонка кармана)	T=1200°C, в атмосфере O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	d <sub>x</sub> = 0,6 мкм, x <sub>j</sub> = 10 мкм ρ <sub>s</sub> = 0,8 Ом / □ (p-карман)
8	<b>Фотолитография 2.</b> Создание маски для ионного легирования областей n+ исток/сток и n+ изоляции		
9	Травление SiO <sub>2</sub>	Буферный травитель	
10	Ионное легирование фосфором. Формирование n+ исток/сток	E = 40 кэВ D = 1000 мкКл/см <sup>2</sup>	x <sub>j</sub> = 0,8 мкм

11	Удаление фоторезиста	«ПХ» + «КАРО»	
12	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
13	<b>Фотолитография 3.</b> Создание маски для ионного легирования областей p+ исток/сток и p+ изоляции		$x_j = 1,0$ мкм
14	Травление SiO <sub>2</sub>	Буферный травитель	
15	Ионное легирование бором. Формирование n+ исток/сток.	E = 60 кэВ D = 700 мкКл/см <sup>2</sup>	
16	Удаление фоторезиста	«ПХ» + «КАРО»	
17	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
18	<b>Фотолитография 4.</b> Вскрытие окон для создания областей затворного окисла МДП транзисторов p - и n - типа		
19	Травление SiO <sub>2</sub>	Буферный травитель	
20	Ионное легирование бором. Подгонка пороговых напряжений МДП транзисторов p - и n - типа	E = 40 кэВ D = 0.06 мкКл/см <sup>2</sup>	
21	Удаление фоторезиста	«КАРО»	
22	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
23	Окисление	T=950°C, в атмосфере O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	$d_x = 0,1$ мкм
24	<b>Фотолитография 5.</b> Создание маски для травления контактных окон и n+, p+ исток/стокам и n+, p+ изоляции		
25	Травление SiO <sub>2</sub>	Буферный травитель	
26	Удаление фоторезиста	«КАРО»	
27	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
28	Стабилизация	T=950°C	$d_x = 0,08$ мкм
29	Освежение контактных окон		
30	Напыление металла	Al	$d_x = 1,2$ мкм
31	<b>Фотолитография 6.</b> Создание разводки из металла.		
32	Травление металла		
33	Удаление фоторезиста		
34	Химическая обработка		
35	Осаждение ФСС	T=350°C	$d_x = 0,90$ мкм
36	<b>Фотолитография 7.</b> Создание контактных окон в пассивации.		
37	Травление ФСС		
38	Удаление фоторезиста		

39	Химическая обработка		
40	Вжигание металла	T=450°C	
41	Контроль электрических параметров пластин		5 точек на пластине
42	100 % контроль функционирования кристаллов на пластине		
43	Разделение (скрайбирование) кристаллов на пластине		
44	Посадка кристалла на основание корпуса		
45	Термокомпрессионная приварка выводов		
46	Герметизация корпуса		
47	Маркировка микросхем		
48	100 % контроль функционирования кристаллов на пластине (приемосдаточные испытания)		
49	Упаковка микросхем		

Анализ технологии изготовления целесообразно начать с рассмотрения поперечного сечения структуры КМДП транзисторов и топологии КМДП инвертора. В структуре n- и p- канальных транзисторов выделены десять элементов: глубины p-n переходов, p-кармана, n+ и p+ областей, толщины затворного окисла, межслойной изоляции, алюминия, пассивации, размеры поверхностного и углубленного каналов КМДП транзисторов. Следует обратить внимание на изоляцию активных элементов – n- p- канальных транзисторов друг от друга обратными смещенными p-n переходами охранных колец n+ и p+ вокруг p- и n- канальных транзисторов соответственно.

Технологический процесс начинается с создания в подложке n-типа p-кармана для транзисторов n-типа (**фотолитография 1**). После разгонки кармана и одновременного создания межслойной изоляции из окисла кремния металл/подложка, металл/n+, металл/p+ по **фотолитографиям 2 и 3** выполняется топология n+ исток-стоковых областей n-МДП транзисторов и n+ охранных колец вокруг p-МДП транзисторов и p+ исток-стоковых областей p-МДП транзисторов и p+ охранных колец вокруг n-МДП транзисторов. Вскрываются по маскам окна в окисле межслойной изоляции и проводятся легирования n+ и p+ областей.

По **фотолитографии 4** вскрываются окна в окисле межслойной изоляции под области каналов МДП транзисторов. До удаления фоторезиста проводится ионное легирование бором для подгонки пороговых напряжений транзисторов n- и p- типов. Этим легированием создается структура поверхностного канала в n-МДП и углубленного канала в p-МДП транзисторах.

Открытые на 2, 3 и 4 фотолитографиях окна окисляются для создания межслойной изоляции металл/n+, металл/p+ и затворного окисла.

По **фотолитографии 5** над областями n+ и p+ исток-стоков и охранных колец в межслойной изоляции металл/n+, металл/p+ вскрываются контактные окна.

Перед напылением алюминия выполняется термическая операция диффузии фосфора для стабилизации поверхности затворного окисла. Образовавшийся в затворном окисле тонкий слой ФСС непосредственно перед напылением металла удаляется.

Завершается технологический процесс изготовления пластин **фотолитографией 6 и 7** создания алюминиевой разводки и вскрытия окон в слое

пассивации из ФСС над контрактными площадками.

Последними технологическими операциями по пластинам являются контроль электрических параметров пластины по специальным тестовым структурам на соответствие требованиям спецификации на КМДП процесс и 100% контроль функционирования кристаллов.

После разделения пластин на кристаллы, годные по функционированию кристаллы проходят операции сборки в корпус для получения микросхем.

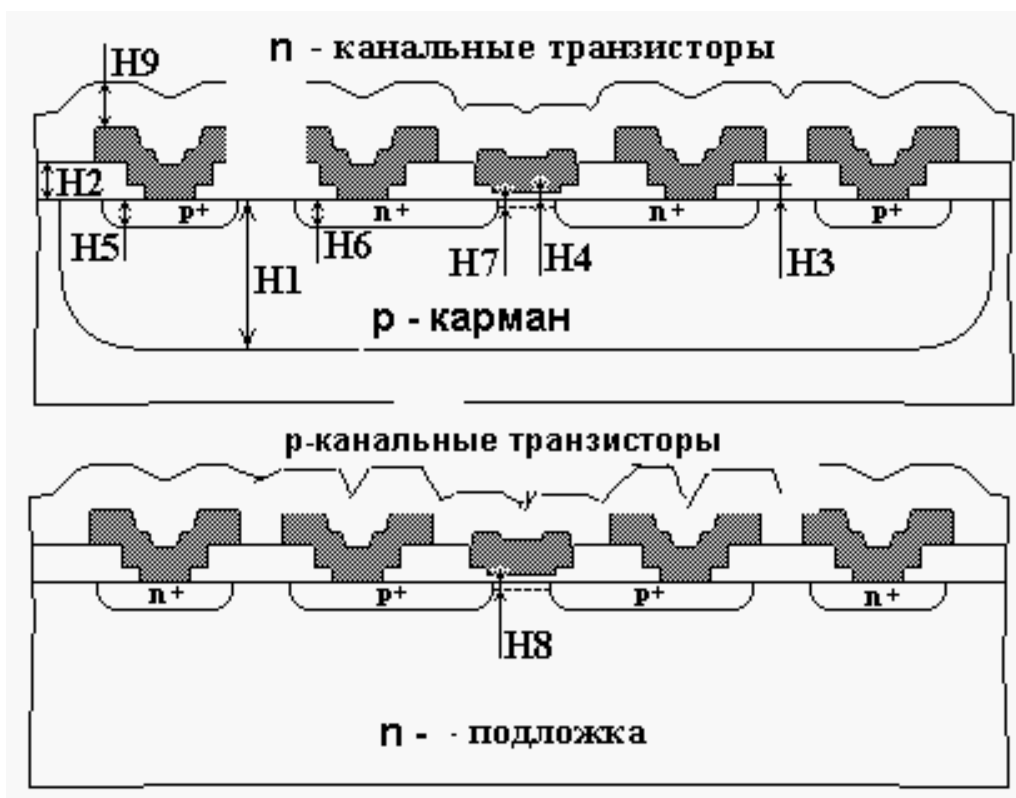


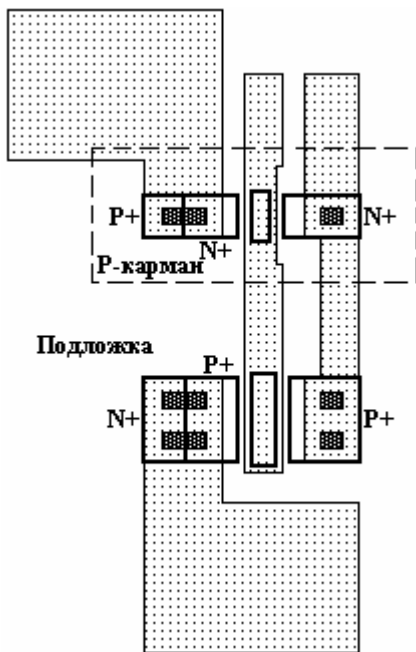
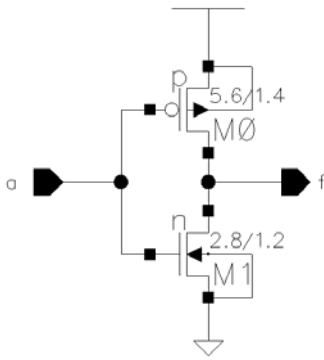
Рис.1. Поперечные сечения структуры n-канального и p-канального транзисторов, изготовленных по КМДП технологическому процессу с алюминиевыми затворами и изоляцией обратно смещенным p-n переходом на кремниевой подложке n – типа.

- H1 - Глубина p-кармана в n-подложке.
- H2 - Толщина межслойной изоляции металл/подложка, металл/n+, металл/p+.
- H3 - Толщина межслойной изоляции металл/n+, металл/p+.
- H4 - Толщина затворного оксида.
- H5 - Глубина p+ исток/стоковых областей r-канальных транзисторов и p+ охранных колец вокруг n-канальных транзисторов.
- H6 - Глубина n+ исток/стоковых областей n-канальных транзисторов и n+ охранных колец вокруг p-канальных транзисторов.
- H7 - Ширина области повышенной концентрации примеси в поверхностном канале n-канальных транзисторов.
- H8 - Глубина p-n перехода в углубленном канале p-канальных транзисторов.
- H9 - Толщина алюминиевой разводки

## Электрическая схема КМДП инвертора

Инвертор состоит из транзистора n-типа и транзистора p-типа. Имеет один вход «a» и один выход «f».

Выполняет функцию инверсии сигнала.



Топология КМДП инвертора:

- 1 - окно затвора (p-МДП, 3 ф/л);
- 2 - затворный окисел (p-МДП, 4 ф/л);
- 3, 4 - окна контакта p<sup>+</sup>, 5 ф/л;
- 5 - затворный окисел (n-МДП, 4 ф/л);
- 6 - окна затвора (n-МДП, 2 ф/л)

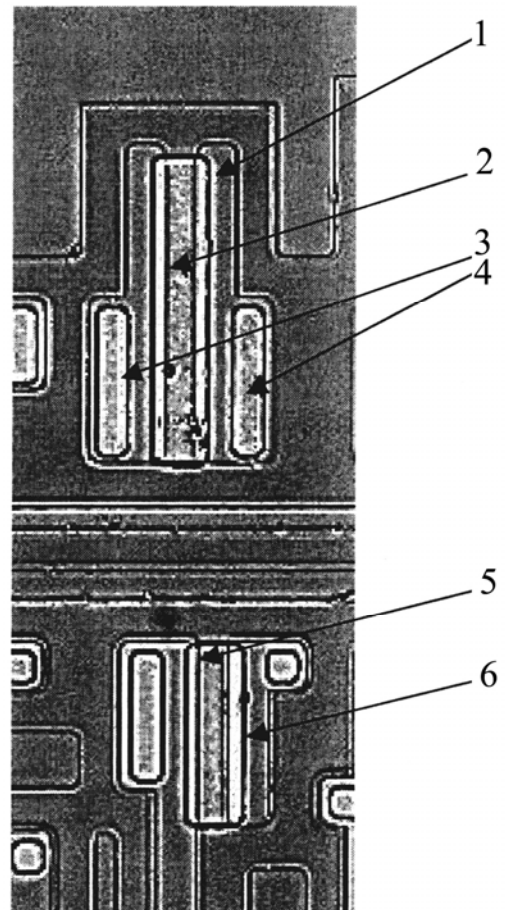


Рис.2. Электрическая схема и топология КМДП инвертора, изготовленного по КМДП технологическому процессу с алюминиевым затвором и изоляцией обратно смещенным p-n переходом.

*Технология изготовления КМДП структур с поликремниевыми затворами и диэлектрической изоляцией*

В таблице 2 представлена маршрутная карта КМДП с поликремниевым затвором и диэлектрической LOCOS изоляцией на кремниевой подложке р – типа. На рисунке 3 показано поперечное сечение МДП структур транзисторов п и р - типа, на рисунке 4 – электрическая схема и топология КМДП инвертора, спроектированного по этому технологическому процессу.

Таблица 2

Маршрутная карта технологического процесса КМДП ИМС с поликремниевым затвором и диэлектрической LOCOS изоляцией на кремниевой подложке р – типа

№	Наименование операции	Режимы, реактивы	Параметры слоев, пластин
1	Составление и маркировка партии пластин		КДБ 12 <100>
2	Окисление	T=950°C, в атмосфере O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	d <sub>x</sub> =0,036 мкм
3	<b>Фотолитография 1.</b> Вскрытие окон в фоторезисте под n-карманы		
4	Ионное легирование фосфором. Формирование n - карманов.	E = 90 кэВ D = 0,9 мкКл/см <sup>2</sup>	
5	Удаление фоторезиста	«КАРО»	
6	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
7	<b>Фотолитография 2.</b> Вскрытие окон в фоторезисте под р-карманы		
8	Ионное легирование бором. Формирование р - карманов.	E = 60 кэВ D = 0,7 мкКл/см <sup>2</sup>	
9	Удаление фоторезиста	«КАРО»	
10	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
11	T = 1200°C, в атмосфере O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	d <sub>x</sub> = 0,3 мкм, x <sub>j</sub> = 5 мкм ρ <sub>s</sub> = 1.2 Ом / □ (n-карман)	
12	Стравливание SiO <sub>2</sub>	Буферный травитель	
13	Химическая обработка	КАРО, ПА	
14	Окисление	T=950°C, в атмосфере O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	d <sub>x</sub> =0,036 мкм
15	Осаждение Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	T=600°C	d <sub>x</sub> =0,13 мкм
16	Окисление	T=950°C, в атмосфере O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	d <sub>x</sub> =0,036 мкм
17	<b>Фотолитография 3.</b> Вскрытие окон в нитридной маске для создания активных областей р- и п- типа		

18	РИТ Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>		Min d <sub>x(ост)</sub> =0,25 мкм (по SiO <sub>2</sub> )
19	Удаление фоторезиста	«КАРО»	
20	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
21	<b>Фотолитография 4.</b> Вскрытие окон в фоторезисте для создания охранных областей р-типа под полевым окислом в р-кармане		
22	Ионное легирование бором. Формирование охранных областей р – типа.	Е = 20 кэВ D = 10 мкКл/см <sup>2</sup>	
23	Удаление фоторезиста	«КАРО»	
24	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
25	Окисление (Формирование полевого окисла)	Т=950°С, в атмосфере O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	d <sub>x</sub> =0,85 мкм
26	Удаление Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	
27	Стравливание SiO <sub>2</sub>	Буферный травитель	
28	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
29	Окисление	Т=950°С, в атмосфере O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	d <sub>x</sub> =0,05 мкм
30	Ионное легирование бором. Подгонка пороговых напряжений МДП транзисторов п– и р– типа.	Е = 40 кэВ D = 0,08 мкКл/см <sup>2</sup>	
31	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
32	<b>Фотолитография 5.</b> Вскрытие окон в фоторезисте для создания областей п – типа встроенного канала в транзисторах п-типа.		
33	Ионное легирование фосфором. Формирование охранных областей р – типа.	Е = 40 кэВ D = 10 мкКл/см <sup>2</sup>	
34	Удаление фоторезиста	«КАРО»	
35	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
36	Стравливание SiO <sub>2</sub>	Буферный травитель	
37	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
38	Окисление	Т=950°С, в атмосфере сухого O <sub>2</sub> .	d <sub>x</sub> = 0,030 мкм
39	Осаждение поликристаллического кремния	Т=600°С	d <sub>x</sub> =0,5 мкм
40	Диффузия фосфора	Т=900°С	ρ <sub>s</sub> =20 Ом / □
41	<b>Фотолитография 6.</b>		



	Создание затворов МДП транзисторов и разводки из поликристаллического кремния.		
42	РИТ поликремния		Min $d_{x(ост)}=0,20$ мкм (по SiO <sub>2</sub> )
43	Удаление фоторезиста	«КАРО»	
44	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
45	Окисление поликремния	T=850°C, в атмосфере O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	$d_x=0,01$ мкм по кремнию
46	<b>Фотолитография 7.</b> Создание маски для ионного легирования областей n+ исток/сток		
47	Ионное легирование фосфором. Формирование N- исток/сток	E = 40 кэВ D = 1.0 мкКл/см <sup>2</sup>	
48	Ионное легирование мышьяком. Формирование n+ исток/сток	E = 60 кэВ D = 700 мкКл/см <sup>2</sup>	
49	Удаление фоторезиста	«ПХ» + «КАРО»	
50	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
51	<b>Фотолитография 8.</b> Создание маски для ионного легирования областей p+ исток/сток		
52	Ионное легирование ВF <sub>2</sub> . Формирование n+ исток/сток	E = 90 кэВ D = 300 мкКл/см <sup>2</sup>	
53	Удаление фоторезиста	«ПХ» + «КАРО»	
54	Химическая обработка	«КАРО», «ПА»	
55	Окисление	T=950°C, в атмосфере сухого O <sub>2</sub> .	$d_x=0,036$ мкм
56	Осаждение SiO <sub>2</sub>	T=450°C	$d_x=0,20$ мкм
57	Осаждение ФСС	T=450°C	$d_x=0,60$ мкм
58	Оплавление ФСС	T=1000°C, в атмосфере N <sub>2</sub> сух.	
59	<b>Фотолитография 9.</b> Создание маски для травления контактных окон к поликремнию и n+, p+ исток/стокам.		
60	Травление ФСС	Буферный травитель	Min $d_{x(ост)}=0,50$ мкм (по SiO <sub>2</sub> )
61	РИТ ФСС		Min $d_{x(ост)}=0,01$ мкм (по SiO <sub>2</sub> )
62	Удаление фоторезиста	«КАРО»	
63	Химическая обработка	«КАРО»	
64	Освежение контактных окон		
65	Напыление металла	Al + 1%Si	$d_x=1,0$ мкм

66	<b>Фотолитография 10.</b> Создание разводки из металла.		
67	РИТ металла		
68	Удаление фоторезиста	ПХ удаление	
69	Химическая обработка	ЕКС	
70	Осаждение SiO <sub>2</sub>	T=200°C	d <sub>x</sub> =0,20 мкм
71	Осаждение Si <sub>x</sub> N <sub>y</sub> O <sub>z</sub>	T=200°C	d <sub>x</sub> =0,80 мкм
72	<b>Фотолитография 11.</b> Создание контактных окон в пассивации.		
73	РИТ пассивации		
74	Удаление фоторезиста	ПХ удаление	
75	Химическая обработка	ЕКС	
76	Вжигание металла	T=400°C	
77	Контроль электрических параметров пластин		5 точек на пластине
78	100 % контроль функционирования кристаллов на пластине		
79	Разделение (скрайбирование) кристаллов на пластине		
80	Посадка кристалла на основание кристаллодержателя в плате		
81	Термокомпрессионная приварка выводов		
82	Герметизация кристаллодержателя		
83	100 % контроль функционирования плат с кристаллами (приемосдаточные испытания)		
84	Упаковка плат		

Анализ технологии изготовления также целесообразно начать с рассмотрения поперечного сечения структуры КМДП транзисторов и топологии КМДП инвертора. В структуре n- и p- канальных транзисторов выделены пятнадцать элементов: глубины p-n переходов n- и p- кармана, n+ и p+ областей, толщины затворного окисла, поликремния, полевого окисла, межслойной изоляции, пассивации, алюминия, размеры поверхностного и углубленного каналов КМДП транзисторов. Следует обратить внимание на изоляцию активных элементов – n- p- канальных транзисторов друг от друга полевым окислом (для n- канальных транзисторов – полевым окислом с p-охраной), созданным специальным LOCOS процессом.

Технологический процесс включает 11 фотолитографий. Он начинается с создания в подложке p-типа n-кармана для транзисторов p-типа (1 фотолитография) и областей повышенной концентрации бора в подложке или p-кармана для транзисторов n-типа (**2 фотолитография**).

После разгонки карманов и удаления окисных слоев начинается создание изоляции между транзисторными структурами LOCOS процессом. По нитридной маске, состоящей из слоя нитрида кремния на подслое окисла, выполняют **3 фотолитографию** – оставляют нитрид над активными областями транзисторных структур и удаляют нитрид в зазорах между активными областями. По **4 фотолитографии** проводят легирование примесью p-типа зазоров между активными областями транзисторов n-типа. Энергию ионного легирования бором выбирают так,

чтобы примесь не попадала сквозь нитридную маску в активные области транзисторов n-типа, не защищенную фоторезистом. Таким способом получают легированные р-охраной области зазоров, самосовмещенные с активными областями по границе нитридной маски. Локальное окисление не покрытых нитридом зазоров между активными областями создает диэлектрическую изоляцию КМДП транзисторов. При этом полевой окисел вокруг n-канальных транзисторов лежит на подслое р-охраны, препятствующей образованию инверсного слоя положительным зарядом в полевом окисле. LOCOS процесс завершается селективным удалением нитридной маски с активных областей транзисторов.

Далее активные области подвергаются предварительному окислению. Это окисление предотвращает возможность появления дефектов в затворном окисле по границе с полевым окислом. Причиной дефектов могут стать остатки неударенного оксинитрида – так называемый эффект «белой полосы». По предварительному окислу выполняют подгонку пороговых напряжений транзисторов и создают структуру поверхностного канала в n-МДП и углубленного канала в р-МДП транзисторах. По предварительному окислу проводят легирование встроенного канала (**5 фотолитография**) для создания конденсаторов между областью встроенного канала и затвором из поликремния.

После удаления предварительного окисла проводят затворное окисление, осаждение поликремния, легирование поликремния диффузией фосфора. На **6-й фотолитографии** формируют затворы транзисторов и разводку из поликремния. На **7 и 8-й фотолитографии** создают n+ и р+ исток-стоковые области КМДП транзисторов n+ и р+ области контактов к карманам и подложке. Области n+ типа создаются легированием мышьяком с добавлением малого фосфора для достижения плавного р-n перехода, увеличения пробивного напряжения и смягчения эффекта горячих носителей в n-канальных транзисторах.

Межслойная изоляция металл/n+, металл/р+, металл/поликремний образуется осаждением слоев окисла и фосфорно-силикатного стекла (ФСС). Топологический рельеф под металл сглаживается растеканием слоя ФСС при оплавлении.

На **9-й фотолитографии** вскрываются контактные окна в межслойной изоляции к областям n+, р+ и поликремнию.

Завершается технологический процесс изготовления пластин **10 и 11-й фотолитографиями** создания алюминиевой разводки и вскрытия окон в слое пассивации из слоев окисла и оксинитрида над контрактными площадками.

Последними технологическими операциями по пластинам являются контроль электрических параметров пластины по специальным тестовым структурам на соответствие требованиям спецификации на КМДП процесс и 100% контроль функционирования кристаллов.

После разделения пластин на кристаллы, годные по функционированию кристаллы проходят операции сборки для получения микросхем.

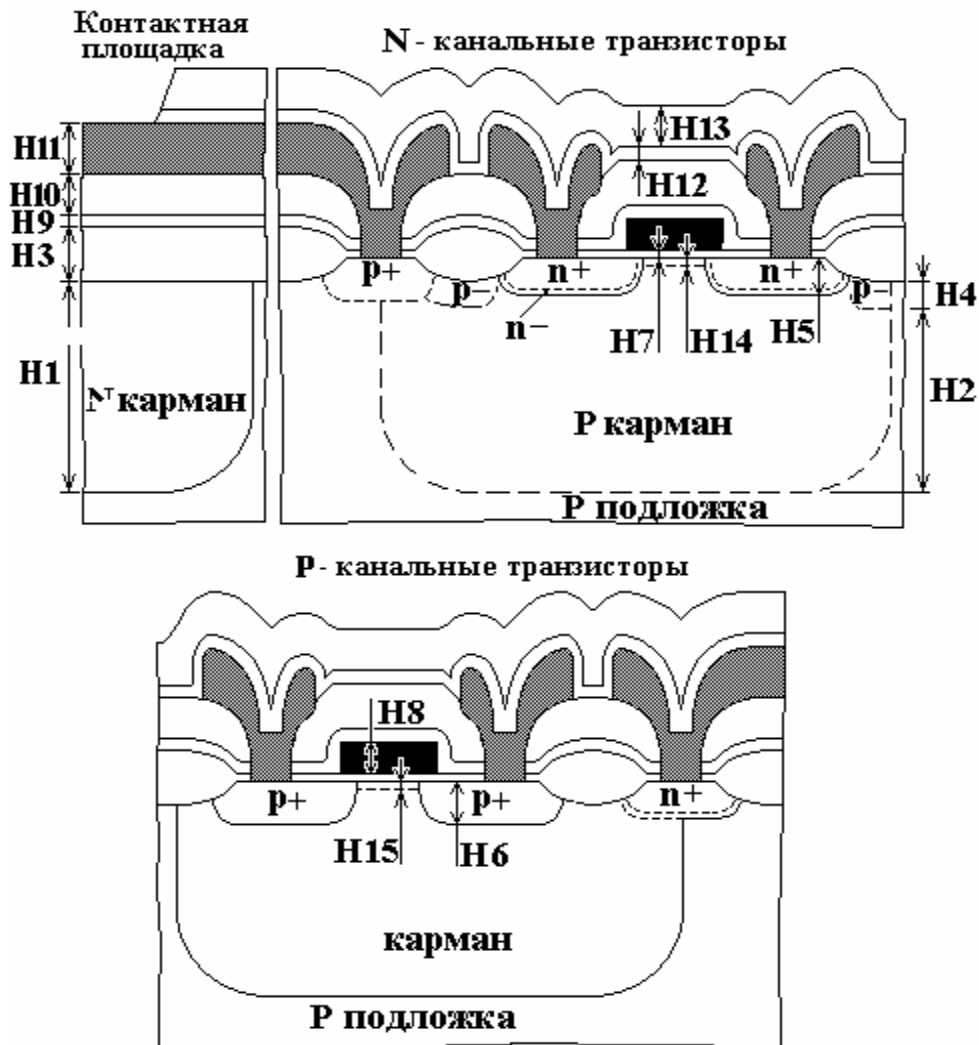
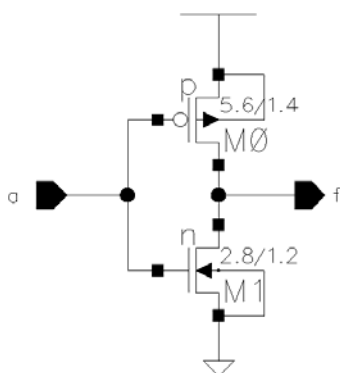


Рис.3. Поперечные сечения структуры n-канального и p-канального транзисторов, изготовленных по КМДП технологическому процессу с поликремниевым затвором и диэлектрической LOCOS изоляцией на кремниевой подложке р – типа:

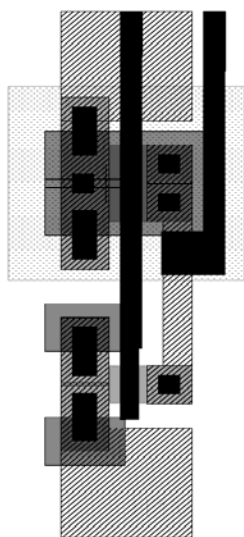
- H1 - глубина n-кармана в p-подложке;
- H2 - глубина повышенной концентрации бора в p-подложке (p-карман);
- H3 - толщина полевого (LOCOS) окисла;
- H4 - глубина p-охраны в p-подложке и p-кармане под полевым окислом;
- H5 - глубина n+ исток/стоковых областей n- канальных транзисторов и n+ областей контакта к n- карману;
- H6 - глубина p+ исток/стоковых областей p-канальных транзисторов и p+областей контакта к p-карману и p-подложке;
- H7 - толщина затворного окисла;
- H8 - толщина затвора и разводки из поликремния;
- H9 - толщина межслойной изоляции из окисла металл/подложка, металл/n+ металл/p+;
- H10 - толщина межслойной изоляции из ФСС металл/подложка, металл/n+ металл/p+;
- H11 - толщина алюминиевой разводки;
- H12 - толщина пассивации из окисла;
- H13 - толщина пассивации из оксинитрида;
- H14 - ширина области повышенной концентрации примеси в поверхностном канале n-анальных транзисторов;
- H15 - глубина p-n перехода в углубленном канале p-анальных транзисторов.



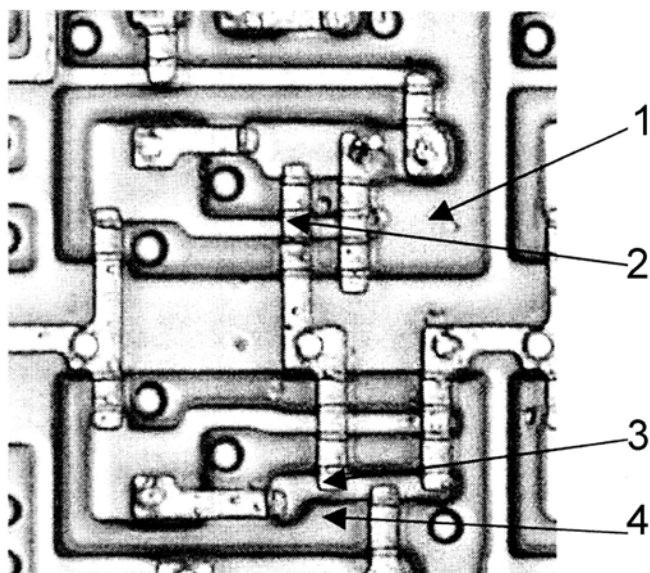
Электрическая схема КМДП инвертора

Инвертор состоит из транзистора p-типа и транзистора r-типа. Имеет один вход «a» и один выход «f».

Выполняет функцию инверсии сигнала.



Топология КМДП инвертора:



- 1 – p<sup>+</sup> - активная область;
- 2 – p – канал МДП – транзистора;
- 3 – n – канал МДП – транзистора;
- 4 – n<sup>+</sup> - активная область.

Рис.4. Электрическая схема и топология КМДП инвертора, изготовленного по КМДП технологическому процессу с поликремниевым затвором и диэлектрической LOCOS изоляцией на кремниевой подложке p – типа.

#### Описание изучаемых изделий

##### Микросхема ЭК587ИК1

В качестве изделия 1, изготавливаемого по КМДП технологии с алюминиевым затвором и изоляцией p-n переходом использована микросхема ЭК587ИК1.

Интегральная полупроводниковая микросхема ЭК587ИК1 является схемой обмена информации микропроцессорного комплекта и представляет собой автономный асинхронный восьмиразрядный модуль обработки и коммутации информации и служит для организации внутри- и внепроцессорного параллельного и последовательного обмена данными, интерфейса процессоров, каналов, построения блоков прерывания, для использования в контроллерах периферийных устройств, управления ОЗУ и т.д.

### *Конструктивные характеристики*

Микросхема ЭК587ИК1 изготавливается по КМДП технологии в металлокерамическом корпусе типа 429-42-1, количество выводов – 42, вес микросхемы – не более 5,0 г.

*Основные технические характеристики при  $T=25\pm 10^{\circ}\text{C}$ .*

Напряжение питания, В	9±10%
Потребляемая мощность в статическом режиме, мВт	не более 10
Выходное напряжение логического нуля при $I_{\text{H}}=2,2$ мА на выводах 19,20,22 и $I_{\text{H}}=1,3$ мА на остальных выводах, В	не более 0,5
Выходное напряжение логической единицы при $I_{\text{H}}=1,3$ мА, В	не более 7,6
Ток утечки входов, мкА	не более 1,0
Время выполнения операции, мкс	не более 1,5
Время выполнения коммутации, мкс	не более 1,5
Емкость нагрузки, пФ	50

### *Условия эксплуатации*

Микросхема ЭК587ИК1 сохраняет электрические и конструктивные параметры при эксплуатации в следующих условиях:

- температура окружающей среды от  $-25^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ ;
- относительная влажность воздуха 98% при  $T=25^{\circ}\text{C}$ ;
- вибрация в диапазоне частот от 1 до 600 Гц с ускорением 10g;
- многократные удары с ускорением 75g;
- линейные (центробежные) нагрузки с ускорением 25g.

### *Функциональный состав*

Данная микросхема включает следующие функциональные блоки (рис. 5):

- три информационных восьмиразрядных канала (К1, К2, К3);
- схемы обмена 1, 2, 3;
- схему захвата;
- восьмиразрядный регистр (Р1);
- восьмиразрядный регистр (Р2);
- логическое устройство (ЛУ);
- коммутатор;
- регистр режима (РР);
- регистр маски состояния (РМС);
- схему формирования состояний (СФС);
- регистр микрокоманд (РМК);
- дешифратор микрокоманд (ДШ);
- блок синхронизации (БС);
- схему начальной установки (СНУ).

Каналы К1, К2, К3 для приема и выдачи информации. Схемы обмена 1, 2, 3 управляют приемом и выдачей информации, вырабатывают сопровождающие выдаваемую информацию сигналы К1В, К2В, К3В и отмечают прием информации сигналами К1П, К2П, К3П.

При работе нескольких источников информации на один канал наличие сигнала К1П свидетельствует о занятости канала и блокирует выдачу информации из БИС. При незавершившемся обмене в предыдущей микрокоманде схема обмена блокирует выполнение следующей микрокоманды до окончания обмена.

Схема захвата позволяет выдавать информацию в один из каналов К1 или К3 по предварительному запросу. Выдача информации может начаться лишь при наличии сигнала ЕК1/К3. Отсутствие сигнала ЕК1/К3 блокирует схему обмена, а та,

в свою очередь, - выполнение следующей микрокоманды. Принадлежность схемы захвата К1 или К3 определяется состоянием регистра режима.

Регистры Р1, Р2 предназначены для временного хранения информации. Р1 является восьмиразрядным сдвиговым регистром, Р2 - восьмиразрядным регистром-счетчиком.

Логическое устройство ЛУ служит для выполнения операций маскирования, сравнения, выделения левого нуля информации. ЛУ содержит схему анализа результата операции на присутствие единиц во всех разрядах результата, которая формирует сигнал сравнения СР «1».

Коммутатор устанавливает внутренние связи, необходимые для выполнения микрокоманд, а также формирует сигнал М2 дополнения до нечетного числа единиц информации, проходящей через него.

Регистр режима РР служит для хранения кода режима, предназначенного для расширения набора микрокоманд БИС. Загрузка РР осуществляется либо из К1, К3, либо из микрокоманды. Регистр режима состоит из пяти триггеров.

Регистр маски состояния РМС служит для хранения кода маски состояния и содержит четыре триггера. Загрузка РМС осуществляется либо из К1 или К3, либо из микрокоманды.

Схема формирования состояния СФС служит для формирования сигнала на выводе «Q».

Регистр микрокоманд РМК служит для приема и хранения кода микрокоманды.

Дешифратор микрокоманд ДШ служит для формирования управляющих сигналов. Входы дешифратора подключены к регистру режима и регистру микрокоманд. Кроме того, дешифратор стробируется сигналами из блока синхронизации.

Блок синхронизации БС формирует временную диаграмму работы БИС, имеет вход запуска «С» и выход синхронизации «Ф1». Последний, для синхронно работающих БИС, объединяется, образуя при этом функцию «производное И». По положительному фронту «Ф1» синхронизируется окончание приема и начало выдачи информации нескольких БИС.

Подключением внешнего генератора синхроимпульсов к выводу «Ф1» обеспечивается синхронная работа БИС.

Схема начальной установки СНУ при включении питания устанавливает триггеры БС и схем обмена в исходное состояние, а также обнуляет регистры Р1, Р2, РР и РМС. СНУ срабатывает также от микрокоманды начальной установки, при этом БС и схемы обмена устанавливаются в исходное состояние для приема новой микрокоманды, а регистры Р1, Р2, РР и РМС сохраняют прежнее состояние.

#### Микросхема КБ145ВИЗ

В качестве изделия 2, изготовляемого по КМДП технологии с поликремниевым затвором и диэлектрической LOCOS изоляцией представлена микросхема КБ145ВИЗ.

Бескорпусная микросхема КБ145ВИЗ является КМДП интегральной низкороговой микромощной схемой и предназначена для получения сигналов управления сдвоенным 3.5 разрядным с показом двоеточия жидкокристаллическим (LCD) дисплеем в часах.

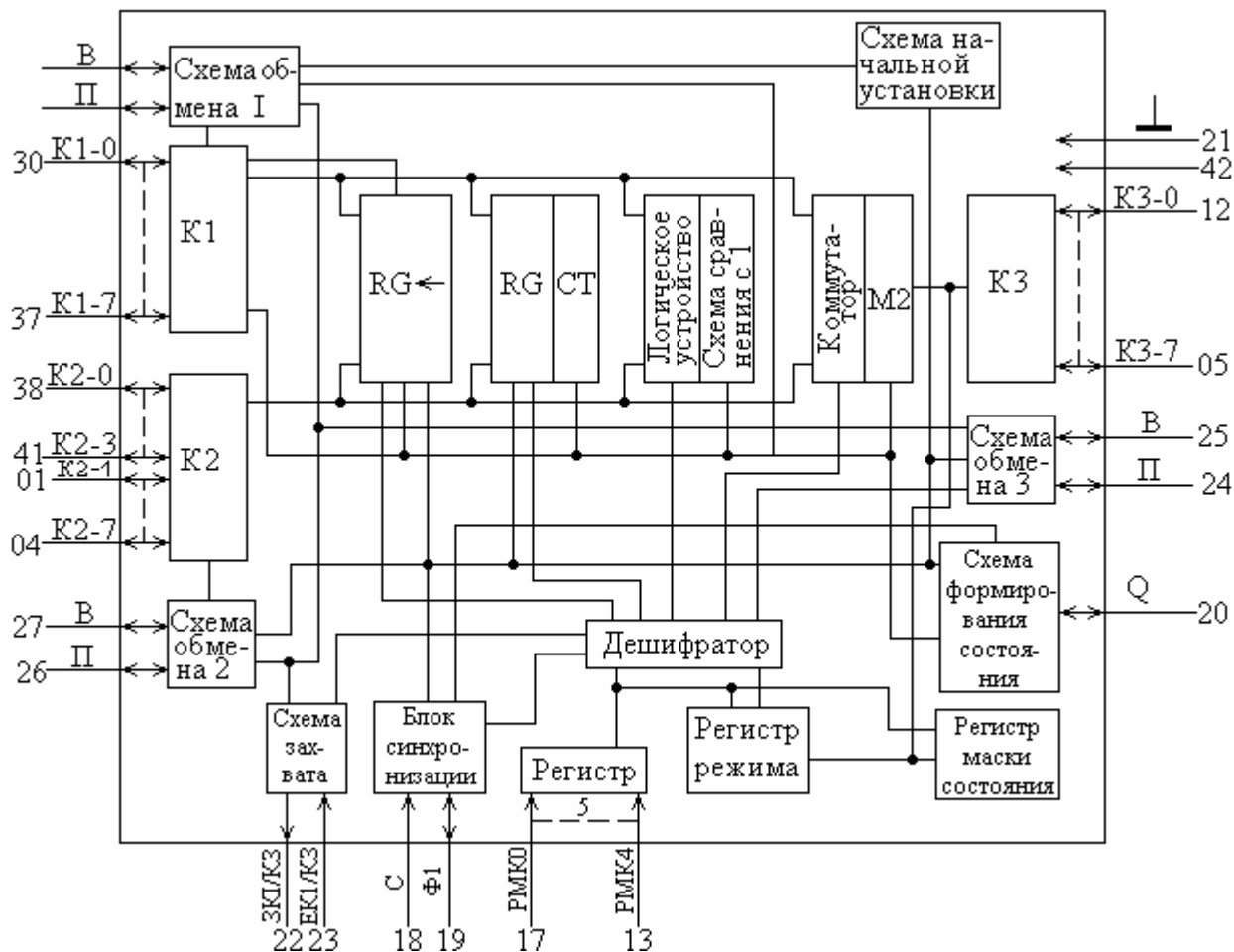


Рис. 5. Схема электрическая структурная изделия 1 (ЭК587ИК1).

Информация о секундах, минутах, часах, дате и месяце получается делением рабочей частоты 32768 Гц от встроенного внутри кристалла генератора. Сигналы, управления сдвоенным жидкокристаллическим дисплеем поступают непосредственно с одиночных (однофазных) и сдвоенных (двухфазных) выходов микросхемы. Микросхема КБ145ВИЗ содержит аналого-цифровую схему подстройки частоты генератора, которая позволяет получить увеличение рабочей частоты до 32772 Гц. Получение на выходе сигнала с частотой 512 Гц делением рабочей частоты используется как сигнал запуска удвоителя напряжения.

#### Конструктивные характеристики

Бескорпусная микросхема КБ145ВИЗ имеет 25 выводов. Размер кристалла 1,39 x 1,2 мм<sup>2</sup>, размер контактных площадок 120 x 120 мкм<sup>2</sup>.

#### Основные функции КБ145ВИЗ

- 5 режимов: месяц, дата, часы, минуты, секунды;
- выбор способа отображения времени и даты на дисплее;
- внесение одним касанием коррекции времени в пределах 30сек;
- календарь на 4 года;
- двойной переключатель последовательных режимов;
- тестирование жидкокристаллического дисплея.

#### Основные особенности КБ145ВИЗ

- однокристалльное исполнение;
- управление сдвоенным 3,5 разрядным жидкокристаллическим дисплеем;
- низкий уровень потребления (типовой  $I_{\text{пот}}=0.8$  мкА, максимальный  $I_{\text{пот}}=1.5$  мкА при напряжении питания 1.5 В);
- дисплей с показом двоеточия;



- рабочая частота 32768 Гц;
- работа от одиночной батарейки 1.5 В;
- внутренний емкостный удвоитель напряжения;
- схемное устранение дребезга на входах при включении;
- защита против статического электричества;
- встроенная в кристалл сеть входных и выходных емкостей генератора;
- встроенный делитель рабочей частоты 32768 (или 32772) Гц (масочная опция).

*Предельные условия эксплуатации ( $T=25^{\circ}\text{C}$ )*

Характеристика	Обозначение	Значение	Размерность
Напряжение питания: ( $V_{DD} \sim V_{SS}$ ) ( $V_{DD} \sim V_{EE}$ )	$V_{GG}$	0.3 ~ +2.0	В
	$V_{DE}$	0.3 ~ +4.6	В
Рабочая температура	$T_{OPR}$	2.0 ~ +75	$^{\circ}\text{C}$
Температура хранения	$T_{OPR}$	55 ~ +126	$^{\circ}\text{C}$

*Основные технические характеристики при  $T=25\pm 10^{\circ}\text{C}$ .*

Характеристика	Обозначение	Условия измерения	Значение			Размерность
			мин.	тип.	макс.	
Рабочее напряжение	$ V_{DD} $		1.2	1.5	1.7	В
Рабочее напряжение	$ V_{EE} $		2.4	3.0	3.4	В
Ток потребления	$I_{DD}$	Без нагрузки		0.8	1.5	$\mu\text{A}$
Напряжение лог. нуля	$V_{IL}$		- 0.3		0	В
Напряжение лог. единицы	$V_{IH}$		$V_{SS}+0.3$		$V_{SS}$	В
Ток активации при вкл.	$I_{SW}$	$V_{IN}=V_{DD}$	0.1	1.0	10	nA
Напряжение старта генератора	$V_{OSC}$	Через 5сек			1.45	В
Напряжение остановки генератора	$V_{OSP}$	Через 5сек			1.15	В
Вх./Вых. емкость генератора	$C_I/C_O$			20/20		pФ
Частота генератора	$F_{OSC}$	$C_I=20$ pФ, $C_O=20$ pФ		32768		Гц
Частота DC-DC преобразователя	$V_{CON}$	$C1=0.1$ pФ,		512		Гц
Частота LCD дисплея	$F_D$			32		Гц
Время установки при включении	$T_D$				62.5	мсек

### ***Описание лабораторного оборудования***

1. Кассеты с изучаемыми изделиями, в которых находятся образцы, снятые с различных технологических операций.
2. Оптический микроскоп.
3. Увеличительные стекла.

### **Требования к отчету**

*Отчет должен содержать:*

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткие сведения по технологии (технологиям) изготовления МДП интегральных микросхем.
4. Краткие сведения об изучаемом изделии.
5. Результаты выполнения заданий, сведенные в таблицы формы 1 и 2.
6. Выводы по работе, отражающие особенности конкретного изучаемого технологического процесса.

### **Лабораторное задание**

*Домашнее задание*

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Изучить технологию изготовления КМДП структур с алюминиевым и поликремниевым затворами, используя описание лабораторной работы и рекомендуемую литературу.
3. Выполнить пп. 1 - 4 раздела «Требования к отчету».
4. Подготовить форму таблицы 1 (2 шт.) и форму таблицы 2.
5. Подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

*Работа в лаборатории*

1. Рассмотреть под микроскопом образцы изделия 1 по заданному варианту, находящиеся в кассете 3-1.
2. Определить, в какой последовательности они изготовлены.
3. Заполнить графы формы таблицы 1, используя последовательность операций технологического процесса (таблица 1 описания) и отмечая характерные признаки операций.
4. Рассмотреть под микроскопом образцы изделия 2 по заданному варианту, находящиеся в кассете 3-2 и повторить пп. 2, 3 данного раздела, заполняя форму таблицы 1 (второй ее экземпляр) с помощью данных таблицы 2 описания.
5. Произвести оптические измерения областей элементов по варианту, указанному в таблице 3, и занести результаты в форму таблицы 2.
7. Показать преподавателю результаты выполнения работы и оформить отчет в соответствии с требованиями раздела «Требования к отчету».

Форма таблицы 1

Технологические операции изготовления МДП ИМС

Изделие \_\_\_\_\_ Технология \_\_\_\_\_ Вариант \_\_\_\_\_

№	Наименование операции в маршрутной карте (табл. 11 или 12)	Номер операции в маршрутной карте	Характерные признаки операции	Номер пластины в кассете

## Конструктивные параметры МДП структур

Обозначение элемента по схеме	Наименование области	Размеры		Эскиз топологии элемента
		мкм	мкм	

Таблица 3

## Варианты элементов структур для оптических измерений

Номер бригады	1 и 6	2 и 7	3 и 8	4 и 9	5 и 10	Резерв
Номер варианта	1	2	3	4	5	
Изделие 1	VT 1	VD 1				
Изделие 2		VD 1, VD 2	VT 1	VT 50	VT 51	R1, VD1 VD 2

**Порядок выполнения работы****Внимание!**

Пластины с образцами очень хрупки. После рассмотрения пластин сразу же ставьте их в кассету.

1. Получить две кассеты 3-1 и 3-2 с номером варианта, соответствующего номеру бригады. Номер варианта является третьим элементом обозначения кассеты.

2. Рассмотреть под микроскопом образцы изделия 1, размещенные в кассете 3-1. Для правильного определения названия технологической операции и их последовательности необходимо учесть следующие рекомендации:

а) найдите пластину (кристалл) с наименьшим количеством сформированных областей и определите операцию, выполненную на этой пластине;

б) помните, что поверхность чистого кремния в окнах маскирующего окисла белая или светло - серая; поверхность чистого поликремния желтого цвета; окисел на поверхности кремния может быть разного цвета, но области, которые сформированы одновременно, имеют одинаковый цвет;

в) затем найдите пластину, на которой выполнена следующая операция, и определите ее наименование и т. д.;

г) можно использовать и другую методику, основанную на анализе фигур совмещения, которые располагаются на периферии кристалла.

Результаты выполнения п.1 сводятся в форму таблицы 1, причем наименование и номер операций берут из маршрутной карты (см. табл. 1 описания).

3. Определить характерные признаки выбранных технологических операций и занести в форму таблицы 1. К этим признакам относятся: наблюдаемые в поле зрения окуляра микроскопа материалы пленок или масок на поверхности пластины, цвет окраски слоев и окон, состояние поверхности и т. п.

4. Рассмотреть под микроскопом образцы изделия 2, размещенные в кассете 3-2. Для правильного определения названия технологической операции, ее характерных признаков и последовательности этих операций необходимо использовать рекомендации пп. 2, 3. Результаты работы сводятся в форму табл. 1.

5. Произвести оптические измерения конструктивных параметров элементов МДП ИМС по заданному варианту (по табл. 3) в соответствии с номером бригады. Для этого необходимо:

а) определить цену деления шкалы окуляра микроскопа;

б) взять пластину (кристалл) с последней операции технологического процесса и пользуясь принципиальной схемой исследуемой ИМС (см рис. 3 или 4) найти измеряемый элемент по топологии, начав поиск от внешней контактной площадки кристалла;

в) для каждой области элемента МДП ИМС определить два конструктивных параметра: длину и ширину в микрометрах и занести в форму таблицы 1.

6. Нарисовать в форме таблицы 2 эскиз (эскизы) измеряемых элементов без соблюдения масштаба, но с указанием областей и выводов.

7. Показать преподавателю результаты выполнения работы и оформить отчет по лабораторной работе в соответствии с требованиями раздела «Требования к отчету».

### ***Контрольные вопросы***

1. Назовите последовательность основных технологических операций изготовления КМДП структур с алюминиевыми затворами.

2. Нарисуйте сечение комплементарной пары МДП транзисторов с алюминиевым затвором и изоляцией р-п переходом и укажите области истока, стока, затвора и канала, изолирующего перехода.

3. Назовите последовательность основных технологических операций изготовления КМДП структур с поликремниевыми затворами.

4. Нарисуйте сечение комплементарной пары МДП транзисторов с диэлектрической изоляцией и поликремниевыми затворами и укажите области стока, истока, затвора и канала, диэлектрической LOCOS изоляции

5. Расскажите методику определения операции, с которой снят образец при визуальном осмотре.

6. Как произвести оптические измерения конструктивных параметров МДП - структур?

7. Как выращивается тонкий подзатворный окисел?

8. Для чего в МДП - структурах нужен толстый окисел? Как его выращивают?

9. Почему для межслойной изоляции и пассивации используют фосфорносиликатное стекло?

10. Зачем при изготовлении МДП транзисторов р-типа необходимы две структуры углубленного канала?

11. Какие материалы используют для получения затворов МДП транзисторов? Особенности поликремниевых затворов.

12. Почему в КМДП структур выполняют операции подгонки пороговых напряжений?

13. Зачем делают р-охрану под полевой окисел в LOCOS процессе?

14. Почему производят легирование поликремниевых затворов?

15. Количество и назначение операций окисления (влажного и сухого) при производстве КМДП структур с алюминиевыми затворами.

16. Количество и назначение операций окисления (влажного и сухого) при производстве КМДП структур с поликремниевыми затворами.

17. Количество и назначение операций ионного легирования и диффузии при производстве КМДП структур с алюминиевыми затворами.

18. Количество и назначение операций ионного легирования и диффузии при производстве КМДП структур с поликремниевыми затворами.

19. Количество и назначения операций фотолитографии при производстве КМДП структур с алюминиевыми затворами.

20. Количество и назначение операций фотолитографии при производстве КМДП структур с поликремниевыми затворами.

## **Лабораторная работа 12**

### **Изучение планарно-эпитаксиальной технологии изготовления полупроводниковых микросхем на биполярных транзисторах**

#### *Цель работы*

1. Изучить технологические операции производства полупроводниковых микросхем.
2. Изучить последовательность технологических операций при изготовлении полупроводниковых микросхем на биполярных транзисторах.
3. Ознакомиться с оборудованием и материалами, применяемыми в производстве полупроводниковых микросхем.
4. Ознакомиться с методами измерения параметров слоев полупроводниковых микросхем.
5. Определить глубину залегания диффузионного слоя.

#### *Теоретические сведения*

Общая технологическая схема процессов производства полупроводниковых интегральных микросхем (ИС) включает подготовительные процессы, формирование структуры ИС, в том числе межсоединений ее элементов, и заключительные процессы.

В комплекс подготовительных процессов входит изготовление требуемого комплекта фотошаблонов, а также ряд подготовительных операций: подготовка полупроводниковых подложек (пластин), корпусов ИС и др.

Формирование структуры полупроводниковой ИС происходит по планарно-эпитаксиальной технологии, заключающейся в создании элементов ИС в приповерхностных слоях полупроводниковой пластины с одной (рабочей) стороны с использованием эпитаксиального наращивания тонкого слоя кремния, при групповой обработке пластин. Причем, отдельные процессы групповой обработки, например, фотолитография, диффузия примесей, окисление, очистка поверхности пластины, носят циклический характер, т.е. обычно многократно повторяется при синтезе структуры полупроводниковых ИС и каждая последовательность процессов формирует определенную часть структуры ИС. Изменение количества таких последовательностей дает возможность получать полупроводниковые ИС различной сложности. При этом физико-химическая сущность повторяющихся процессов часто остается неизменной, а меняются только технологические режимы, фотошаблоны, используемые для фотолитографии, и некоторые материалы технологических сред. Под технологической средой следует понимать совокупность технологических материалов и воздействий, обеспечивающих требуемую реализацию синтеза объекта производства. Формирование структуры ИС заканчивается получением межсоединений элементов и защитой (кроме выводных контактных площадок) полупроводниковой ИС пассивирующим покрытием.

Заключительные процессы обычно представляют собой совокупность индивидуальных обработок объекта производства, включая контроль функциональных параметров ИС и разбраковку кристаллов, разделение пластин на кристаллы, сборку и монтаж кристаллов в корпусах, герметизацию, выходной контроль, механические и климатические испытания, покраску корпусов ИС (при необходимости), маркировку, лакировку (при необходимости) и упаковку готовых ИС.

### *Основные этапы планарно-эпитаксиальной технологии*

Особенностью планарно-эпитаксиальной технологии, как отмечалось ранее, является повторение ряда однотипных групповых технологических процессов, от количества и последовательности выполнения которых зависит степень сложности конкретной ИС. Создание структуры кремниевой ИС на биполярных транзисторах с изоляцией элементов обратносмещенными р-п переходами представляет собой простейший вариант реализации планарно-эпитаксиальной технологии, используемой для производства полупроводниковых ИС малой и средней степени интеграции и реже - БИС.

Основные этапы планарно-эпитаксиальной технологии включают следующие технологические процессы: подготовка поверхности пластин к выполнению конкретной технологической операции: окисление пластин кремния, фотолитография, диффузия примесей в кремний, а для БИС может применяться сочетание диффузии (диффузионного легирования) и ионного легирования кремния, эпитаксиальное наращивание кремния, формирование одного или нескольких слоев металлизации, нанесение диэлектрических покрытий (см. рис. 1 и 2).

*Подготовка поверхности пластин (очистка)* в планарно-эпитаксиальной технологии осуществляется с целью удаления различного вида загрязнений, вносимых из производственной и технологических сред при изготовлении ИС. От степени чистоты поверхности зависит качество выполнения всех операций технологического цикла, параметры и выход годных изделий, а также их эксплуатационная надежность. Поэтому очистка поверхности пластин - наиболее многократно повторяющийся процесс, обеспечивающий технологически чистую поверхность с содержанием остаточных загрязнений не более  $10^{-7}$ - $10^{-9}$  г/см<sup>2</sup> при учете требований к чистоте поверхности, которые неодинаковы на разных этапах производственного процесса изготовления ИС. Чтобы обеспечить эффективность и экономичность процесса очистки, надо знать вид и степень загрязнения поверхности, характер влияния загрязнений на объект производства, требования к чистоте поверхности, механизмы процессов очистки в различных очистительных средах, методы контроля чистоты поверхности, а также производительность оборудования для очистки.

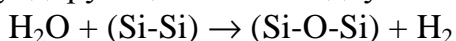
Вид и степень загрязнения поверхности пластин обычно определяется технологическими операциями, предшествующими очистке, а требования к чистоте поверхности - операциями, выполняемыми вслед за ней. Последовательность очистительных операций выбирается в зависимости от типа загрязнений с учетом обеспечения наиболее полного их удаления и избежания повторного их осаждения на очищенную поверхность. Например, если на поверхности имеются молекулярные загрязнения типа органических жиров, остатков фоторезиста и др., придающих поверхности гидрофобные свойства, то их удаляют при жидкостной химической обработке в первую очередь, иначе они будут препятствовать последующей стадии очистки от ионных и атомарных примесей. В производстве полупроводниковых ИС оптимально сочетается использование очистительных процессов в жидких, газовых и плазменных технологических средах, при этом механизмы процессов удаления загрязнений могут быть физическими (механическим удалением), химическими (удаление переводом загрязнения в состояние растворимых либо газообразных соединений с помощью химических реакций при непрерывном удалении этих соединений из технологических сред), а также комбинированными (присутствуют физический и механический механизмы удаления загрязнений), например, при плазмохимической обработке. Материалы для химического и других способов обработки приведены в приложении 5 описания данной работы (см. табл. П.1. и

П.2.).

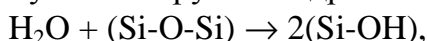
*Окисление пластин кремния (термическое окисление)* выполняется с целью создания на их поверхности пленки  $\text{SiO}_2$ , используемой на разных стадиях изготовления элементов микросхемы в качестве сплошной, а чаще селективной маски, а остающаяся после изготовления микросхемы термически выращенная пленка  $\text{SiO}_2$  служит для электрической изоляции элементов ИС со стороны рабочей поверхности при электрических измерениях и эксплуатации ИС.

Процесс термического окисления поверхности пластин кремния обычно проводят в диффузионной печи в атмосфере сухого кислорода, влажного кислорода или паров воды при температуре порядка  $1000-1200^\circ\text{C}$ . Рост термического  $\text{SiO}_2$  происходит на границе раздела  $\text{Si-SiO}_2$  (так как при комнатной температуре поверхность  $\text{Si}$  обычно содержит пленку  $\text{SiO}_2$  толщиной  $0,005-0,01$  мкм из-за большого сродства кремния к кислороду), которая в процессе окисления движется в глубь пластины ( $\approx 40\%$  толщины  $\text{SiO}_2$  образуется за счет материала кремниевой пластины), а внешняя поверхность  $\text{SiO}_2$  движется в противоположную сторону за счет больших размеров молекул  $\text{SiO}_2$  в сравнении с размерами взаимодействующих частиц. Этим частично объясняется наличие рельефа (ступеньки) в  $\text{Si}$  после локального термического окисления областей элементов ИС (например, при диффузии легирующих примесей) даже после полного удаления  $\text{SiO}_2$  с поверхности пластины кремния.

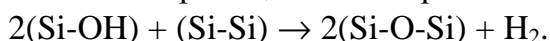
Кинетика процесса термического окисления обычно включает стадии: адсорбцию окислителя из технологической среды поверхностью пластины; диффузию частиц окислителя к границе раздела  $\text{Si-SiO}_2$ ; химическое взаимодействие окислителя с кремнием с образованием новых слоев  $\text{SiO}_2$ ; диффузию газообразных продуктов сквозь  $\text{SiO}_2$  к внешней его поверхности с последующей их десорбцией и удалением газовым потоком (последняя стадия характерна для комбинированных окислительных технологических сред). Скорость окисления определяется скоростью самой медленной стадии. После достижения некоторой критической толщины  $\text{SiO}_2$  (на практике она достигается за 1-5 мин. для вышеуказанного диапазона температур термического окисления и описывается линейным уравнением), такой стадией является диффузия окислителя сквозь растущую пленку  $\text{SiO}_2$  к границе раздела  $\text{Si-SiO}_2$ , а процесс окисления при этом подчиняется параболическому закону. Основное различие между окислением в сухом кислороде и парах воды заключается в том, что в последнем случае веществом, диффундирующим сквозь растущую пленку окисла, является не кислород (ионы кислорода), а вода. При этом первые несколько монослоев окисла на поверхности кремния образуются хемосорбцией молекул воды. Дальнейший рост пленки окисла происходит за счет диффузии через нее частиц воды до границы раздела окисел-кремний. Реакция может идти двумя путями: или между атомами кремния в кристаллической решетке и молекулами воды, диффундирующими по междоузлиям окисла:



или по сложной реакции, в частности на границе пар-окисел с образованием промежуточной группы гидроокиси кремния (силанола):



а затем на границе окисел-кремний



Выделяющийся при реакции водород диффундирует через окисел и уносится потоком пара.

Различие в скорости роста окисных пленок объясняется тем, что коэффициент диффузии ( $D$ ) кислородных ионов в  $\text{SiO}_2$  при одной и той же температуре

достаточно мал по сравнению с коэффициентом диффузии водорода и воды, так  $D(O_2)_{1050^{\circ}C}=2,82 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$ ;  $D(H_2)_{1050^{\circ}C}=2,2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ ;  $D(H_2O)_{1050^{\circ}C}=9,5 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$ .

Таким образом, рост основной доли пленки  $SiO_2$  (после достижения критической толщины  $SiO_2$ ) при термическом окислении удовлетворяет эмпирическому параболическому уравнению, полученному для различных окислительных сред:

- для окисления в сухом кислороде  $h^2=21,2t \exp(-1,33/kT)$ ;

- для окисления в парах воды  $h^2=7,56t \exp(-0,8/kT)$ , где

$h$ -толщина  $SiO_2$ , мкм,

$t$ -время процесса окисления, час,

$k$ -постоянная Больцмана,  $k=8,63 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/град}$ ,

$T$ -температура процесса окисления, К.

Так, например, в производственных условиях для окисления в сухом кислороде при  $T=1000^{\circ}C$  пленки  $SiO_2$  с  $h=0,5$  мкм получают в течение 30 часов, а в парах воды, при этой же температуре, в течение 0,8 часов. Эффективность маскирования поверхности кремния пленкой  $SiO_2$  зависит от многих факторов технологического процесса, использующего данную маску, и параметров пленки двуокиси кремния: температуры и времени диффузии, давления паров примесей и концентраций примесей в исходном материале, толщины пленки окисла и т.д. Критерием, определяющим качество маскирования, является отношение коэффициента диффузии примеси в пленке  $SiO_2$  к коэффициенту диффузии той же примеси в кремний. Если это отношение значительно меньше единицы, то будет достигнуто полное маскирование при соответствующей минимальной толщине двуокиси кремния. Необходимо отметить, что пленки  $SiO_2$ , полученные термическим окислением в разных средах, отличаются маскирующими свойствами, поэтому окисление кремния, как правило, проводят в комбинированных технологических средах. Сначала производят окисление в сухом кислороде в течение 5-15 мин. с целью исключения возможности образования высокой концентрации гидроксильных групп на поверхности раздела  $Si-SiO_2$  (при этом скорость окисления мала, а плотность пленки  $SiO_2$  наибольшая), затем для производительного получения необходимой толщины пленки  $SiO_2$  проводят окисление в парах воды (скорость окисления больше, чем в сухом кислороде, но пленки окисла более пористы), а на завершающем этапе, для получения более плотной пленки  $SiO_2$  (уплотнения структуры  $SiO_2$ ), окисление проводят в атмосфере сухого кислорода. Пленки  $SiO_2$  толщиной 0,2-0,4 мкм в планарно-эпитаксиальной технологии обычно используются для маскирования части поверхности пластин от диффузии легирующих примесей при изготовлении неглубоких (с толщиной диффузионного слоя не более 2,0 мкм) областей структуры ИС. При длительной диффузии примесей (например, при разделительной диффузии и др.) или ионной имплантации такая толщина пленки  $SiO_2$  недостаточна, необходима  $h=0,5-0,8$  мкм. Толщина термически выращенных пленок  $SiO_2$ , используемых на конечных операциях изготовления ИС для электрической изоляции элементов микросхемы, должна составлять не менее 0,6 мкм (обычно 0,6-0,9 мкм).

*Фотолитография* - это процесс получения конфигурации элементов микросхем с применением светочувствительных покрытий - фоторезистов. Целью фотолитографии является вскрытие окон в слое маскирующего окисла кремния для формирования диффузионных слоев, для контактов с металлизацией, а также получения конфигурации межсоединений (разводки) в слое металлизации. Технологический процесс фотолитографии включает целый ряд операций: очистку



поверхности пластин, нанесение фоторезиста, сушку слоя фоторезиста (подсушивание, для обеспечения контактной печати), совмещение фотошаблона с пластиной (или имеющимся на ней рисунком) и экспонирование рисунка фотошаблона в слое фоторезиста, проявление рисунка в слое фоторезиста, задубливание фоторезиста для повышения устойчивости фоторезиста в травителе, травление окисла или металлизация в местах, не защищенных фоторезистом, удаление фоторезиста. В некоторых случаях пленку фоторезиста удаляют после ионного легирования, следующего за фотолитографией в слое фоторезиста.

Нанесение фоторезиста в производстве ИС осуществляется центрифугированием. Чем тоньше пленка фоторезиста, тем меньше возникающие в ней механические напряжения и выше точность воспроизведения размеров топологических элементов. Однако слишком тонкие пленки фоторезиста могут оказаться несплошными, поэтому толщину пленок фоторезиста выбирают оптимальной в каждом конкретном случае.

Эффективным способом повышения адгезии фоторезиста к пленке  $\text{SiO}_2$  и др. является ее обработка в парах специальных веществ адгезивов типа гексаметилдисизалана. Используемые в данной работе макетные образцы ИС и БИС изготовлены с применением позитивных фоторезистов типа ФП-РН-7 (для ИС) и ФП-051МК (для БИС), отличающихся разрешающей способностью (например, у ФП-РН-7 она составляет 500-600 линий/мм при толщине слоя 1 мкм, а у ФП-051МК при аналогичной толщине в 2 раза выше). Внедрение разработок новых (с улучшенными параметрами) фоторезистов – не единственный путь совершенствования оптической литографии. Так, с применением проекционного шагового экспонирования в коротковолновом диапазоне УФ-излучения ( $\lambda=0,2-0,29$  мкм) при использовании соответствующих фоторезистов и фазосдвигающих фотошаблонов (в двухслойной структуре которых, благодаря интерференции когерентного света, подавляются дифракционные эффекты) получен минимальный размер элементов БИС равный 0,25 мкм. Повысить разрешающую способность литографии можно с помощью электронно- либо ионно-лучевых, а также рентгеновских систем для формирования изображения в резистах.

*Диффузионное легирование (диффузия) и ионное внедрение* легирующих примесей (ионное легирование) используются в планарно-эпитаксиальной технологии для формирования p-n переходов в структурах микросхем. При этом диффузию применяют чаще в производстве кремниевых ИС как наиболее простой и недорогой способ введения легирующих примесей в кремниевую пластину, стимулируемый высокой температурой (950-1200<sup>o</sup>C). Диффузия может проводиться как в одну стадию (диффузия из неограниченного источника), так и в две стадии (причем вторая стадия – разгонка – это диффузия из ограниченного источника). Если диффузия проводится из неограниченного источника, то распределение примеси в кремнии описывается выражением:

$$N(x,t)=N_0\text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right), \text{ где}$$

$N_0$  – поверхностная концентрация, соответствующая предельной растворимости примеси в кремнии при данной температуре,

erfc – символ, обозначающий дополнение функции ошибок до единицы,

$x$  – глубина проникновения примеси в кремниевую пластину (толщина диффузионного слоя), см,

$D$  – коэффициент диффузии примеси при температуре загонки,  $\text{см}^2/\text{с}$ ,

$t$  – время первой диффузии (загонки), с.

Если диффузия проводится из ограниченного источника примеси (разгонка примеси), то распределение примеси описывается выражением:

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{2D_2t_2}} \exp\left(\frac{-x^2}{4D_2t_2}\right), \text{ где}$$

$Q$  – интегральное количество диффундирующей примеси в пластине [ $\text{см}^2$ ],  
 $D_2$  – коэффициент диффузии примеси при температуре разгонки [ $\text{см}^2/\text{с}$ ],  
 $t_2$  – время разгонки.

Двухстадийная диффузия применяется чаще, особенно для получения локальных диффузионных областей толщиной более 1 мкм, так как при этом возможно прецизионное управление параметрами диффузионных слоев, сохранение локального легирования при толщинах диффузионных слоев 6-12 мкм, а также снижение дефектности получаемых слоев. Во время второй стадии диффузии обычно получают (одновременно) маскирующую, термически выращенную пленку  $\text{SiO}_2$ , используемую при последующей фотолитографии. Диффузия в кремний элементов III и V групп периодической системы происходит, в основном по вакансионному механизму.

Процесс диффузии примеси осуществляется в диффузионных печах, оборудованных кварцевыми трубами с резистивными нагревателями. Температура диффузии в рабочей зоне (куда помещают пластины) поддерживается с точностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Технологической средой при диффузии в открытой трубе (при атмосферном давлении) являются диффузанты (типа  $\text{SbH}_3$ ,  $\text{PH}_3$ ,  $\text{B}_2\text{H}_6$ ), смешиваемые с азотом и кислородом, а чаще – пары жидких диффузантов (типа  $\text{BBr}_3$ ,  $\text{POCl}_3$ ), поставляемые в рабочую зону газом-носителем (обычно  $\text{N}_2$ ) с добавлением кислорода. Диффузию в замкнутом объеме (ампульный способ) проводят в кварцевой ампуле, в которую помещают пластины, источник примеси (например, сурьмы металлической) и затем откачивают ее до остаточного давления  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  Па, либо заполняют инертным газом, после чего запаивают и размещают в рабочей зоне кварцевой трубы диффузионной печи. По окончании первой стадии диффузии ампулу вскрывают, с поверхности пластин удаляют и силикатное стекло и пленку  $\text{SiO}_2$ , после чего проводят разгонку примеси (вторую стадию диффузии) в окислительной среде при температуре на  $100$ - $150^\circ\text{C}$  выше температуры первой стадии диффузии. Данный способ используют не часто и только при формировании скрытого слоя с применением высокотоксичных диффузантов, таких как мышьяк и сурьма.

Иногда диффузию проводят из твердых источников диффузантов (легированных пленок  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , примесно-силикатных стекол, поликристаллического кремния и др.), что имеет свои преимущества, но усложняет сам процесс легирования тем, что перед проведением диффузии надо получить этот источник на поверхности пластин, либо расположив его рядом с пластинами. При этом важно обеспечить высокую воспроизводимость параметров диффузионных слоев, что создает определенные трудности.

Трансмутационное легирование кремния (осуществляется облучением поверхности кремния тепловыми нейтронами, что приводит к ядерным превращениям в нем с образованием изотопа фосфора) представляется перспективным не только потому, что не требует диффузанта, обеспечивает однородное (равномерное) легирование пластин по всему объему, но и вследствие открывающихся возможностей для изготовления мощных дискретных приборов. Однако, в производстве ИС данный способ пока не применим, так как не может быть использован для селективного легирования.

*Ионное легирование* – это процесс внедрения ионизированных атомов (ионов) легирующей примеси с энергией, достаточной для проникновения в приповерхностные области кремниевой пластины. Внедряясь в кристалл, ионы примеси занимают в его решетке положение атомов замещения (при больших дозах большинство ионов останавливается в междоузлиях и электрически нейтральны) и создают соответствующий тип проводимости (в зависимости от типа примеси). Глубина проникновения ионов и характер их распределения в полупроводнике определяется: ускоряющим напряжением ионного ускорителя (блока ионно-лучевой установки), электрофизическими параметрами внедряющихся ионов и атомов полупроводника, направлением движения ионного пучка относительно кристаллографических осей полупроводника, условиями в процессе внедрения и при термообработке пластин после ионного внедрения. Отклонение траектории иона от любой кристаллографической оси влечет за собой увеличение числа столкновений, что препятствует его проникновению в глубь кристалла. Распределение примеси по глубине описывается в этом случае функцией Гаусса. При большой дозе внедренных ионов могут возникнуть большие участки с нарушенной кристаллической решеткой (даже до аморфного состояния). Если при малых дозах траектория ионов соответствует направлению каналирования (направление движения соответствует какой-либо кристаллографической оси, т.е. ион попадает в свободное пространство между рядами атомов), то ионы могут проникать глубоко в кристалл, останавливаясь в конце длины пробега и в этом случае на концентрационном профиле появляется “пик каналирования” (при больших уровнях доз каналирование невозможно). Ионное легирование в сравнении с диффузией имеет ряд преимуществ:

- позволяет внедрять ионы любого элемента в любой кристалл (например, ионами бора или фосфора легировать алмаз, что невозможно диффузией);

- обеспечивает низкотемпературные условия легирования (внедрение ионов происходит практически почти при комнатной температуре, а термообработка после внедрения, для устранения дефектов имплантации, при 600-700<sup>o</sup>C);

- позволяет осуществлять локальное легирование, в том числе получать мелкие p-n переходы с точно заданными размерами в 3<sup>x</sup> измерениях и управляемыми концентрационным профилем;

- обеспечивает точную дозировку примеси даже при очень больших и самых низких уровнях легирования (диапазон концентраций внедряемой примеси соответствует 10<sup>14</sup>-10<sup>21</sup> см<sup>-3</sup>), когда процесс диффузии становится плохо воспроизводимым;

- обеспечивает высокую чистоту процесса легирования, так как ионное внедрение осуществляется в вакуумной среде с остаточным давлением менее 10<sup>-2</sup> Па.

Однако ионное внедрение требует дорогого и сложного оборудования; приводит к нарушению кристаллической структуры подложки (радиационные дефекты); позволяет получать неглубокие легированные слои толщиной 0,1-0,5 мкм (для увеличения толщины требуется проведение второй стадии диффузии, т.е. разгонки примеси в глубь пластины). Кроме того, не все внедренные атомы примеси могут быть электрически активными после ионного легирования, а качество легированных слоев во многом зависит от равномерности нагрева подложки при ионной имплантации, остаточного давления в рабочей камере, а также разновидности и параметров технологических сред термообработки, следующей после ионного внедрения.

Процесс ионного легирования достаточно широко применяется в настоящее время в производстве БИС (преимущественно аналоговых и цифро-аналоговых БИС на биполярных транзисторах) для уменьшения размеров элементов, получения

нужного уровня легирования отдельных областей БИС и других целей. При этом замечено, что применение ионного легирования способствует повышению выхода годных изделий.

В таблице П.3 приложения приведены сведения об элементах структур полупроводниковых ИС и БИС и указаны способы формирования легированных областей, а в таблицах П.1. и П.2. представлены условия формирования этих областей.

*Эпитаксия* – это процесс ориентированного наращивания монокристаллической пленки на монокристаллической подложке (при таком наращивании структура эпитаксиальной пленки должна повторять структуру подложки, независимо от уровня легирования и типа проводимости пленки и подложки).

Применение эпитаксиальных пленок в планарно-эпитаксиальной технологии позволяет получить транзисторные структуры с малой емкостью коллектор-база, малым сопротивлением коллектора и упростить операции по изоляции элементов ИС обратносмещенными р-п переходами.

Метод получения эпитаксиальных слоев принято делить на прямые и косвенные. В прямых методах атомы кремния переносятся от источника к поверхности подложки без промежуточных химических реакций путем испарения из жидкой фазы, сублимации, ионно-плазменного распыления кремния и других разновидностей вакуумного формирования эпитаксиальных пленок. Эпитаксиальное наращивание в этом случае состоит в образовании центров кристаллизации и последовательном формировании плоской двумерной решетки из островков, растущих вдоль поверхности пластины. Скорость образования центров кристаллизации зависит от концентрации газообразного кремния и свободной энергии их формирования.

Однако непрямые (косвенные) методы проще реализуются, лучше контролируются и более предпочтительны для получения легированных эпитаксиальных слоев. В косвенных методах атомы кремния осаждаются на подложке путем разложения соединений кремния на поверхности нагретой подложки ( $1100^{\circ}\text{C}$ - $1250^{\circ}\text{C}$ ). К таким методам относятся методы, основанные на восстановлении в водороде хлоридов кремния, пиролитического разложения силана и органических соединений кремния.

Хлоридный метод получения эпитаксиальных пленок распространен наиболее широко, так как обеспечивает необходимую чистоту процесса. Кроме того,  $\text{SiCl}_4$  легко поддается очистке, нетоксичен и недорог. Перед эпитаксией пластины подвергают газовому травлению в смеси  $\text{H}_2 + \text{HCl}$  в течение 1-2 мин для получения технологически чистой поверхности пластин, затем в реактор подают смесь  $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$  и требуемый диффузант. В реакционной камере при температуре  $1200$ - $1250^{\circ}\text{C}$  происходит реакция восстановления тетрахлорида кремния водородом:

$\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 \leftrightarrow \text{Si}\downarrow + 4\text{HCl}$ , которая осуществляется в два этапа:

$\text{SiCl}_4 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{SiCl}_2 + 2\text{HCl}$ ;

$2\text{SiCl}_2 \leftrightarrow \text{Si}\downarrow + \text{SiCl}_4$ .

Первый этап реакции идет в газовой среде, а второй на поверхности пластины. Скорость роста пленки при этом  $\approx 0,5$  мкм/мин.

Легирование пленки осуществляется либо добавлением к жидкому  $\text{SiCl}_4$  летучей примеси ( $\text{PCl}_3$ ,  $\text{SbCl}_3$ ), либо путем добавления к водороду газообразных  $\text{PH}_3$ ,  $\text{AsH}_3$ ,  $\text{B}_2\text{H}_6$ . Недостатком хлоридного метода является сравнительно высокий диапазон рабочих температур и невозможность получения резких р-п переходов из-за «диффузионного размывания» границы пленка-подложка во время эпитаксии.

Пиролиз силана (при температуре 1200<sup>o</sup>C) и дихлорсилана (1100<sup>o</sup>C) проводят в газообразных средах с добавлением Ag или H<sub>2</sub> в первом случае (силан пирофорен) и Ag или N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub> в другом. Скорость роста пленки для описанных методов ≈0,3 мкм/мин, сильно зависит от концентрации основного рабочего газа и слабее от температуры подложки. При пиролизе силана эпитаксиальные пленки имеют большую плотность, чем другие, кроме того силан и дихлорсилан по сравнению с тетрахлоридом силана более дорогостоящи.

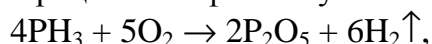
*Металлизация* пластин кремния осуществляется для создания коммутационных проводников, обеспечивающих электрическое соединение элементов ИС (БИС) с минимальным переходным сопротивлением и контактных площадок для монтажа ИС (БИС) в корпусах, либо на коммутационных платах. Для получения стабильного омического контакта металл-полупроводник используют сплав алюминия с кремнием (1, 2% Si), который наносят на пленку SiO<sub>2</sub> методами вакуумного осаждения (ионно-плазменным, либо магнетронным распылением). Характеристики слоев металлизации представлены в таблице 1, а условия их формирования в табл. П.1. и П.2. Использование сплава Al-Si вместо Al объясняется недостатками последнего, усугубляемыми при многоуровневой разводке. Так проявление ряда эффектов в условиях повышенных температур на границах Al-Si, Al-SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>-Al-Si (например, растворение в твердом состоянии Si в Al, химическое взаимодействие Al с SiO<sub>2</sub> и др.), если учесть в этих условиях и повышенную плотность тока в токопроводящей системе, вызывающего электромиграцию Al и Si, приводит к деградации мелкозалегающих p-n переходов в кремнии, а также контакта Al-Si (например, из-за генерации дефектов в Si, возрастания контактного сопротивления, снижения механической прочности контактов и т.д.); к повышению остаточных напряжений в токопроводящей системе; к разрастанию зерен (в пленках Al) нитевидной формы, прорастающих обычно сквозь дефекты верхнего слоя диэлектрика, вызывая, тем самым, отказы БИС (например, за счет закорачивания нижнего и верхнего уровней разводки); к обрывам электрических цепей в местах межуровневой коммутации многоуровневой разводки БИС (например, вследствие окисления Al в системе Al-SiO<sub>2</sub>). Ограничение или устранение отрицательного влияния этих дефектов на качество ИС и БИС осуществляется не только путем использования для металлизации сплавов Al-Si, но и другими методами. В частности, применение в токопроводящей системе барьерных слоев (типа Gr, Ti, Mo, Ni и др.), а также использование новых токопроводящих систем, включающих более термостойкие, чем Al материалы, такие, как тугоплавкие металлы, их сплавы, силициды переходных металлов и др. Перспективными материалами для получения невыпрямляющих контактов считаются металлы платиновой группы (Pt, Pd, Ir, Rh, Os, Ru), способные образовывать в контакте с кремнием переходные слои высокостабильных силицидов (например, Pd<sub>2</sub>Si), обеспечивающих низкие значения удельного переходного сопротивления контакта в широком интервале концентраций примесей n- и p-областей Si. Введение в такую систему небольшого количества тугоплавкого металла (типа V или W) позволяет улучшить структуру и свойства токопроводящей системы. Вместе с тем, для обеспечения высокого качества и надежности многоуровневой разводки БИС, важен поиск и освоение перспективных способов формирования как самой разводки, так и межуровневого диэлектрика, включая разработку новых материалов и технологий.

*Нанесение диэлектрических покрытий* химическим осаждением из газовой фазы (пиролитическим осаждением) либо плазмохимическим осаждением используется для получения толстых слоев SiO<sub>2</sub> при температурах менее 500<sup>o</sup>C, когда термическое окисление неприемлемо из-за существенного изменения

параметров ранее полученных элементов структуры микросхем. Пиролитическое осаждение обеспечивает большую производительность, высокую равномерность слоев, качественное покрытие ступенек металлизации и позволяет создавать изолирующие и пассивирующие слои не только на поверхности кремния, но и на поверхностях других полупроводниковых материалов. Кроме пленок  $\text{SiO}_2$ , пиролитически можно осаждать и пленки  $\text{SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , ФСС и поликристаллического кремния.

При пиролитическом осаждении пленок  $\text{SiO}_2$  происходит термическое разложение сложных соединений кремния (алкоксиланов, например, тетраэтоксисилана) с выделением  $\text{SiO}_2$ , что требует температур  $650\text{--}700^\circ\text{C}$ , поэтому редко используется, либо окисление моносилана:

$\text{SiH}_4 + 2\text{O}_2 \xrightarrow{400\text{--}450^\circ\text{C}} \text{SiO}_2\downarrow + 2\text{H}_2\text{O}$ , что обычно и применяют в производстве ИС и БИС при осаждении фосфорно-силикатного стекла (ФСС) с добавлением к газовой смеси фосфина  $\text{PH}_3$ , разбавленного азотом до 1,5%-ной концентрации. Фосфин вступает в реакцию с кислородом:



образуя  $\text{P}_2\text{O}_5$ , который легирует  $\text{SiO}_2$ . В пленке  $\text{SiO}_2$  оказывается 1-3% фосфора, за счет чего повышается ее термомеханическая прочность, пластичность и снижается пористость. Это позволяет применять данные пленки для пассивации готовых структур ИС и БИС. При содержании фосфора до 8-9% слои ФСС используют для планаризации поверхности пластин, имеющих рельеф. Данный способ отличается от других способов осаждения диэлектрических пленок простотой и недорогой реализацией.

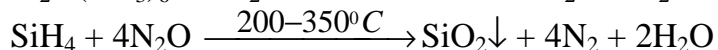
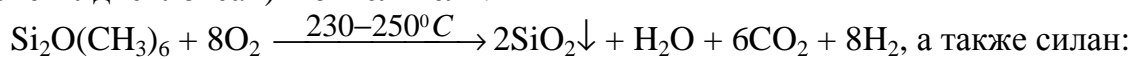
При плазмохимическом осаждении пленок (ПХО) процесс разложения кремнийсодержащих соединений активизируется высокочастотным (ВЧ) разрядом, образующим в газовой среде при пониженном давлении низкотемпературную кислородную плазму. Плазма состоит из атомов, радикалов, молекул, ионов и электронов, в разной степени возбужденных. Плазмохимическое осаждение обычно проводят при давлении в реакционной камере  $66\text{--}660$  Па и частоте ВЧ-разряда  $13,56\text{--}40$  МГц. Температура процесса более низкая, чем при пиролитическом осаждении, благодаря чему получаемые пленки  $\text{SiO}_2$  можно использовать в качестве межслойного диэлектрика многоуровневой разводки (взаимодействия кремния с металлизацией при этом не происходит). Механизм образования пленок при ПХО состоит из трех основных стадий: образования в зоне разряда радикалов и ионов, адсорбции их на поверхности пленки  $\text{SiO}_2$  и перегруппировки адсорбированных атомов. Перегруппировка (миграция) адсорбированных поверхностью атомов и стабилизация их положения представляют важную стадию роста пленки.

Одновременно с образованием пленки происходит десорбция продуктов реакции с поверхности. Скорости десорбции и миграции атомов сильно зависят от температуры пластины, причем при большей температуре получают пленки с меньшей концентрацией захваченных продуктов реакции, большей плотностью и более однородным составом (этим объясняется повышение температуры до  $400^\circ\text{C}$  при ПХО в производстве БИС).

При стимулировании процесса осаждения плазмой появляются новые параметры, влияющие на скорость осаждения пленки, ее состав, плотность, показатель преломления, равномерность, внутренние напряжения и скорость травления. Кроме температуры, состава газовой смеси, ее расхода, давления и геометрии реактора на скорость окисления влияют ВЧ-мощность, напряжение и частота, геометрия электродов и расстояние между ними.

В качестве рабочих газов обычно используют соединения кремния

(гексаметилдисилоксан) и окислители:



Скорость осаждения  $\text{SiO}_2$  при этом получают в пределах 0,1-10 мкм/ч. Пористость получаемых пленок  $\text{SiO}_2$  несколько меньше, чем у пиролитических, но все же выше чем у термически окисленных, хотя остаточные механические напряжения значительно меньше, чем у последних. Сведения о пиролитически и плазмохимически осажденных пленках ФСС и  $\text{SiO}_2$  представлены в таблице 1, табл. П.1., П.2. и П.3.

#### *Определение толщины пленок двуокиси кремния*

Толщину диэлектрических пленок определяют цветовым, интерференционным и эллипсометрическим методами.

*Цветовой метод* используют для экспресс-контроля толщины пленок  $\text{SiO}_2$  от 0,05 до 1,5 мкм. Он основан на том, что прозрачные пленки разной толщины имеют разные цвета за счет интерференции в них одной из составляющих монохроматического света, длина волны которой кратна толщине пленки. Из таблицы 2 видно, что через некоторый диапазон толщин, например 0,27-0,46 мкм, цвета повторяются. Порядковый номер каждого диапазона соответствует порядку отражения. Если номинальное значение толщины пленки неизвестно, то ее травят “на клин” и определяют порядок отражения по числу повторений цвета первой полосы, начиная от чистого кремния. По цветовой шкале можно определить толщину пленки с точностью до 0,02 мкм.

*Интерференционный метод* определения толщины диэлектрических пленок основан на интерференции лучей, отраженных от поверхности пластины и пленки. Разность хода этих двух лучей определяется толщиной пленки, показателем преломления и углом преломления света. Измерения могут быть проведены с разрушением и без разрушения пленки. В первом случае часть пленки стравливают и получают ступеньку. В поле зрения микроинтерферометра (например, типа МИИ-4) наблюдают интерференционную картину в виде смещенных полос.

Если целостность пленки не нарушать, то интерференционная картина будет в виде прямых полос. Когда система интерференционных полос от пучка, отраженного поверхностью пленки, имеет слабую интенсивность, напыляют на ступеньку тонкий (0,02-0,03 мкм) слой алюминия, который усиливает интенсивность картины и, кроме того, делает пленку непрозрачной. Методика определения толщины пленок обычно излагается в описании, прилагаемом к интерферометру. Погрешность интерференционного метода зависит от типа микроинтерферометра и обычно не превышает 10%.

Для более точного определения толщины диэлектрических и поликремниевых пленок используют интерференционный метод, основанный на спектральной зависимости коэффициента отражения от поверхности раздела “пленка-пластина” в видимой области спектра (диапазон длин волн составляет 0,33-0,8 мкм). Положение минимальных и максимальных значений коэффициента отражения зависит от показателей преломления и поглощения, а также от толщины пленки. Интерференционный спектр отражения контролируемого образца получают с помощью спектрофотометра, после чего результаты идентифицируют по имеющимся, например, номограммам и определяют толщину пленки. Погрешность измерения составляет в этом случае  $\approx 2\%$ .

*Эллипсометрический метод* измерения толщины диэлектрических пленок основан на отражении линейно поляризованного лазерного луча от покрытой пленкой пластины. В результате образуется эллиптически поляризованная

отраженная волна. Измерив параметры отраженной волны (фазу и амплитуду), определяют, например, по номограммам, толщину пленки и ее коэффициент преломления. Методом эллисометрии можно выполнять контроль многослойных структур, например  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$  и др., но для этого нужно знать показатели преломления всех слоев и пластины.

#### *Определение толщины эпитаксиальных и диффузионных слоев*

Толщину эпитаксиальных и диффузионных слоев определяют по глубине залегания р-п перехода, который выявляется в простейшем случае методами окрашивания сферического шлифа (химического декорирования). Для этого изготавливают на контрольной пластине (свидетеле) шлиф с помощью вращающегося стального шара диаметром 35-100 мм, смазанного алмазной пастой зернистостью < 1 мкм, к которому прижимают рабочую сторону контролируемой пластины (например, с диффузионным слоем). Глубина сферической лунки должна превышать глубину р-п-перехода (см. рис. 3). Границу р-п-перехода выявляют химическим окрашиванием р-области в концентрированной фтористоводородной кислоте (HF) при интенсивном освещении. Для окрашивания п-области используют водный раствор медного купороса  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  с добавкой 0,1 % концентрированной HF. Легированные области кремния р-типа после окрашивания будут выглядеть темнее окружающего материала, а области п-типа – покрыты осажденной медью.

На окрашенных шлифах под микроскопом измеряют длину хорды Н, по которой определяют глубину залегания р-п-перехода (толщину диффузионного слоя) по формуле:

$$x_j = H^2 n / (8R), \text{ где}$$

$x_j$  – толщина диффузионного слоя [мкм];

$H$  – длина хорды в делениях шкалы окуляра микроскопа [мкм];

$n$  – цена деления шкалы окуляра микроскопа [мкм];

$R$  – радиус шара [мкм].

Погрешность метода  $\approx 10\%$  в диапазоне глубин от 2 до 10 мкм.

Метод окрашивания сферического шлифа непригоден для контроля глубины мелких (< 1 мкм) р-п-переходов из-за большей погрешности. В этом случае используют фотоэлектрический метод сканирования поверхности цилиндрического шлифа сфокусированным лазерным пучком (зондом) с регистрацией кривых фототока (фотоответа) и интерференции.

Реализация данного метода возможна с помощью установки типа ЛПМ-11 с длиной волны оптического излучения  $\lambda=0,44$  мкм, оборудованной оптико-механическим узлом, предметным столом и регистрирующим прибором (самописцем). Этим методом можно также контролировать ионно-легированные и эпитаксиальные р-п-переходы глубиной 0,2-10 мкм с погрешностью  $\approx 3\%$ .



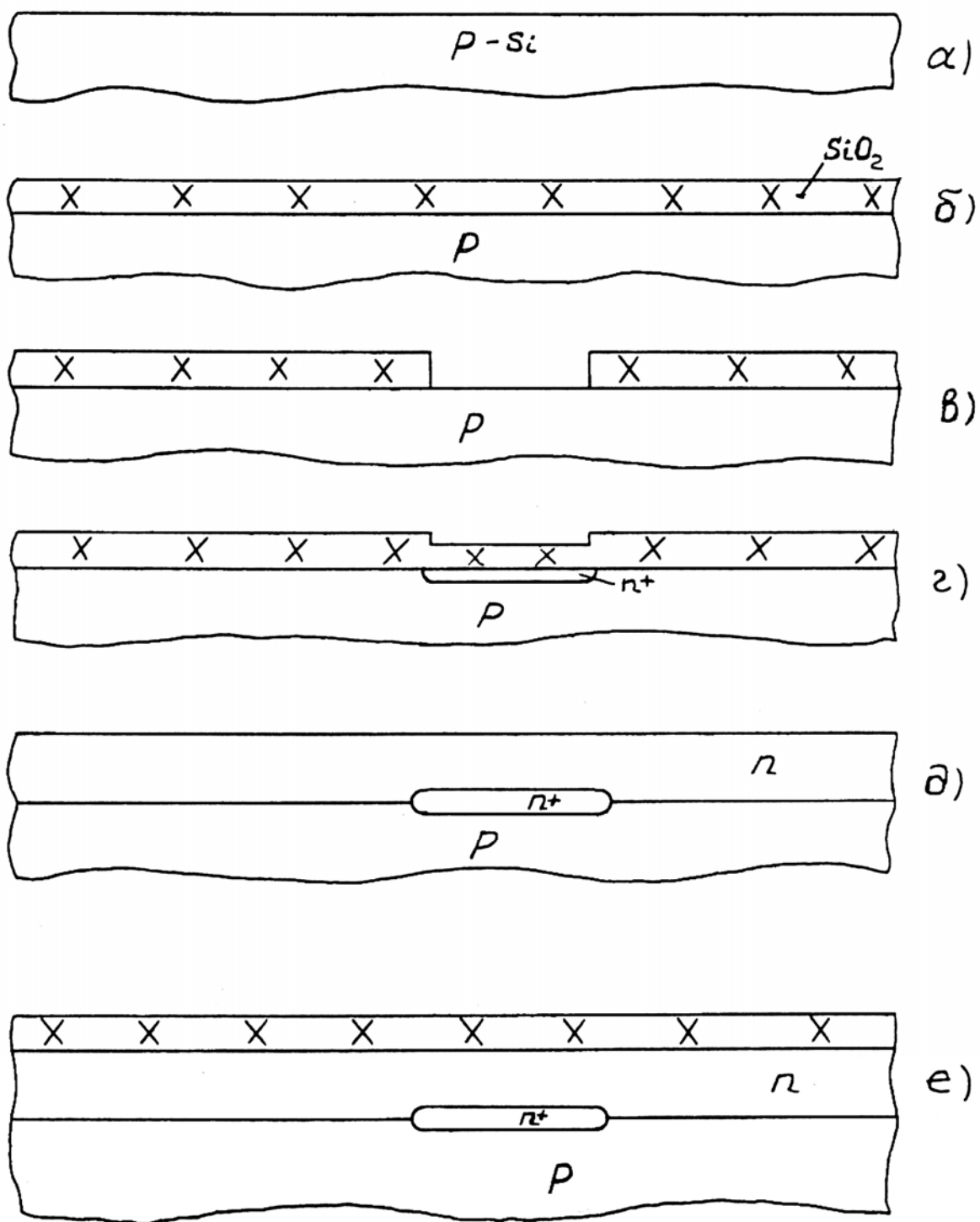
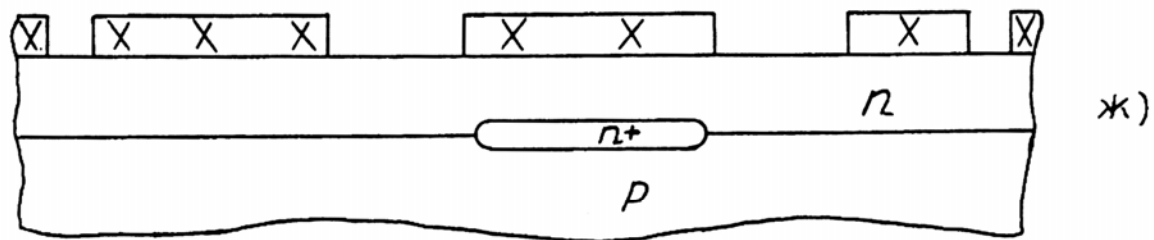
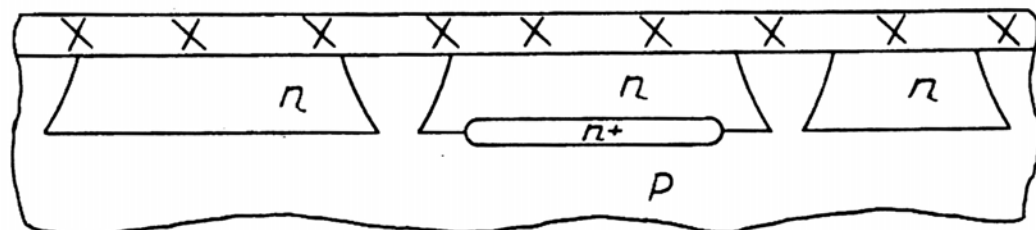


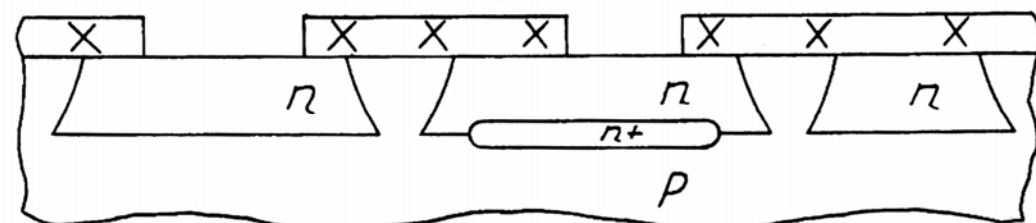
Рис. 1. Фрагменты поэтапного формирования структуры ИС 133ЛА3:  
 а – химическая обработка поверхности исходных пластин кремния;  
 б – окисление пластин кремния;  
 в – фотолитография I для вскрытия окон в  $\text{SiO}_2$  под диффузию сурьмы;  
 г – диффузия сурьмы для формирования скрытых  $n^+$  - слоев;  
 д – эпитаксиальное наращивание  $n$ -слоя кремния;  
 е – окисление пластин;



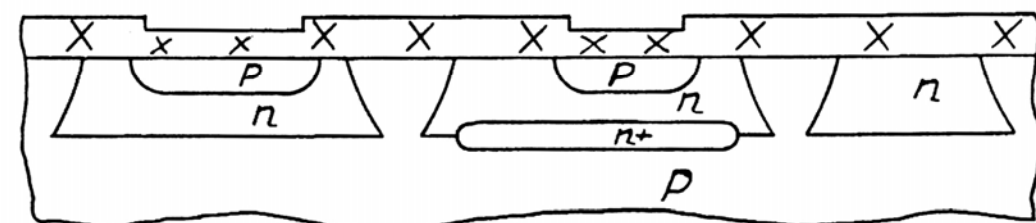
ж)



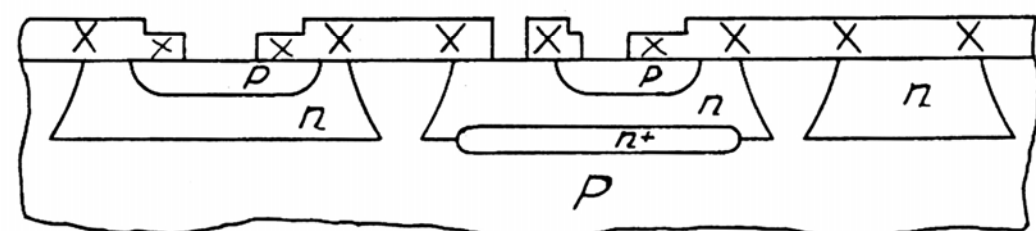
з)



и)



к)



л)

Продолжение рисунка 1:

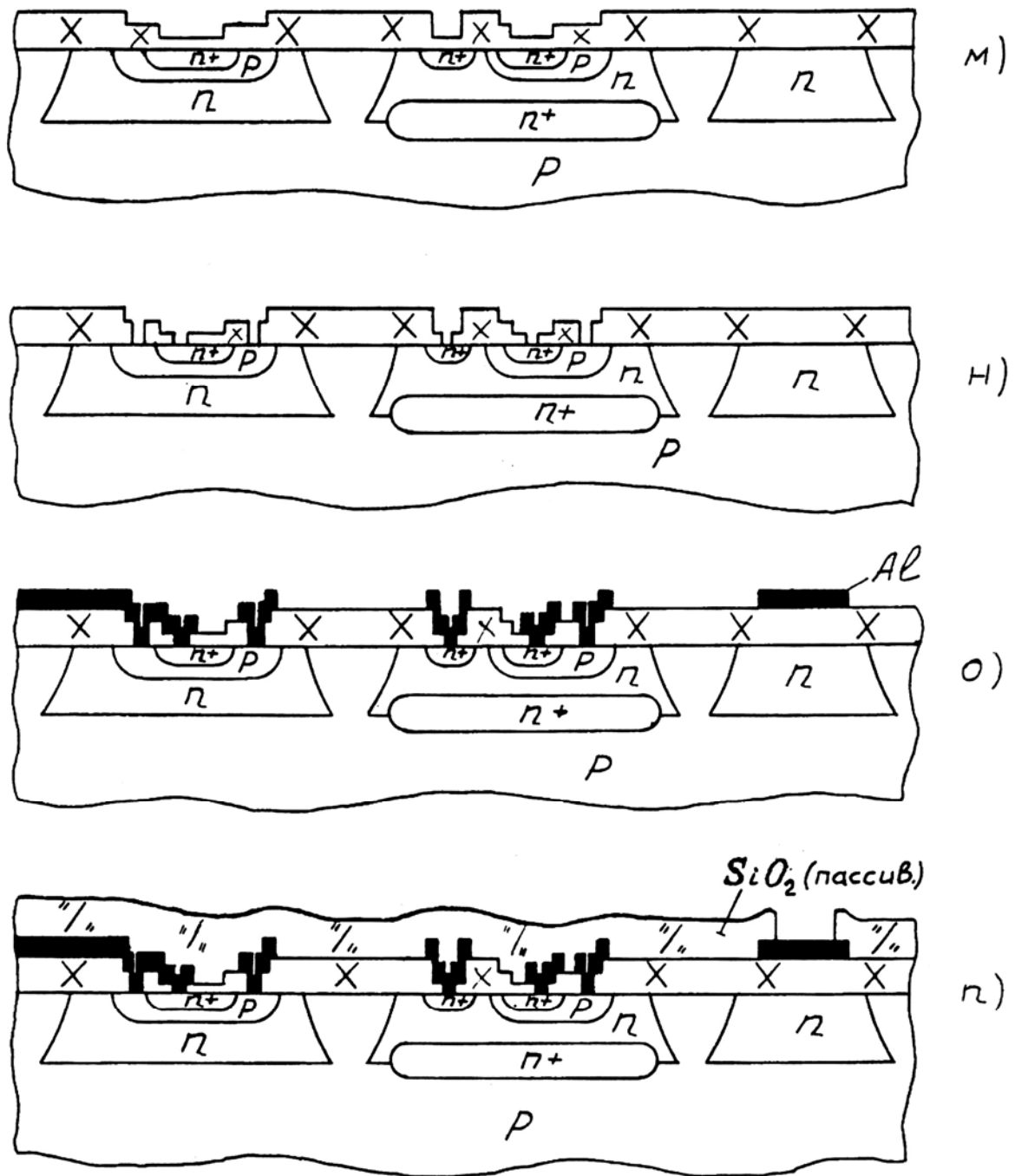
ж – фотолитография 2 для вскрытия окон под разделительную диффузию;

з – диффузия бора для формирования разделительных p-областей;

и – фотолитография 3 для вскрытия окон под базовую диффузию;

к – диффузия бора для формирования базовых p-областей;

л – фотолитография 4 для вскрытия окон под эмиттерную и приконтактно-коллекторную диффузию;



Окончание рисунка 1:

- м – диффузия фосфора для формирования эмиттерных и приконтактных коллекторных  $n^+$  - областей;
- н – фотолитография 5 для вскрытия окон под контакты к элементам ИС;
- о – фотолитография 6 по слою металлизации для формирования коммутации элементов ИС;
- п – фотолитография 7 по слою пассивации для вскрытия окон к контактным площадкам ИС.

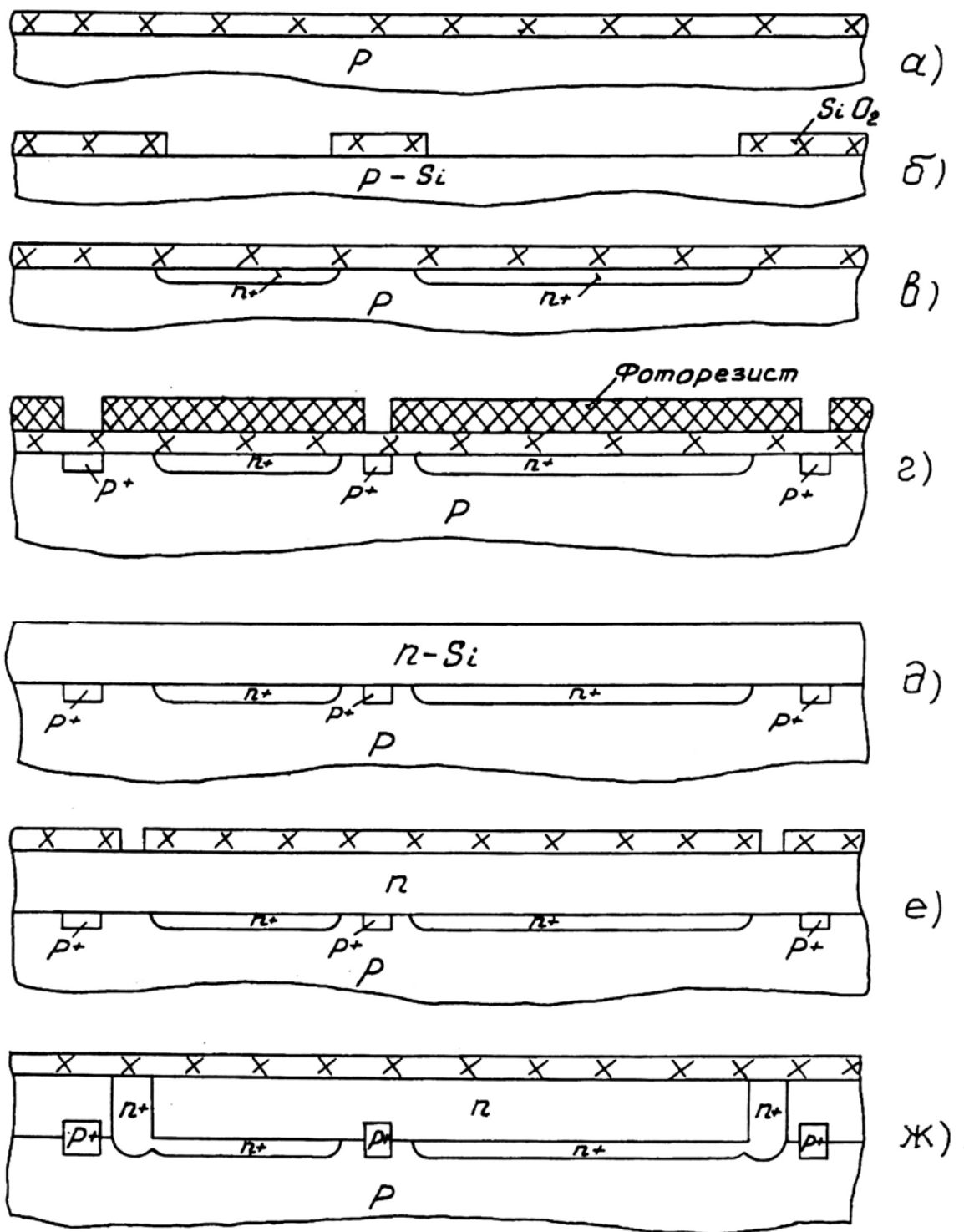
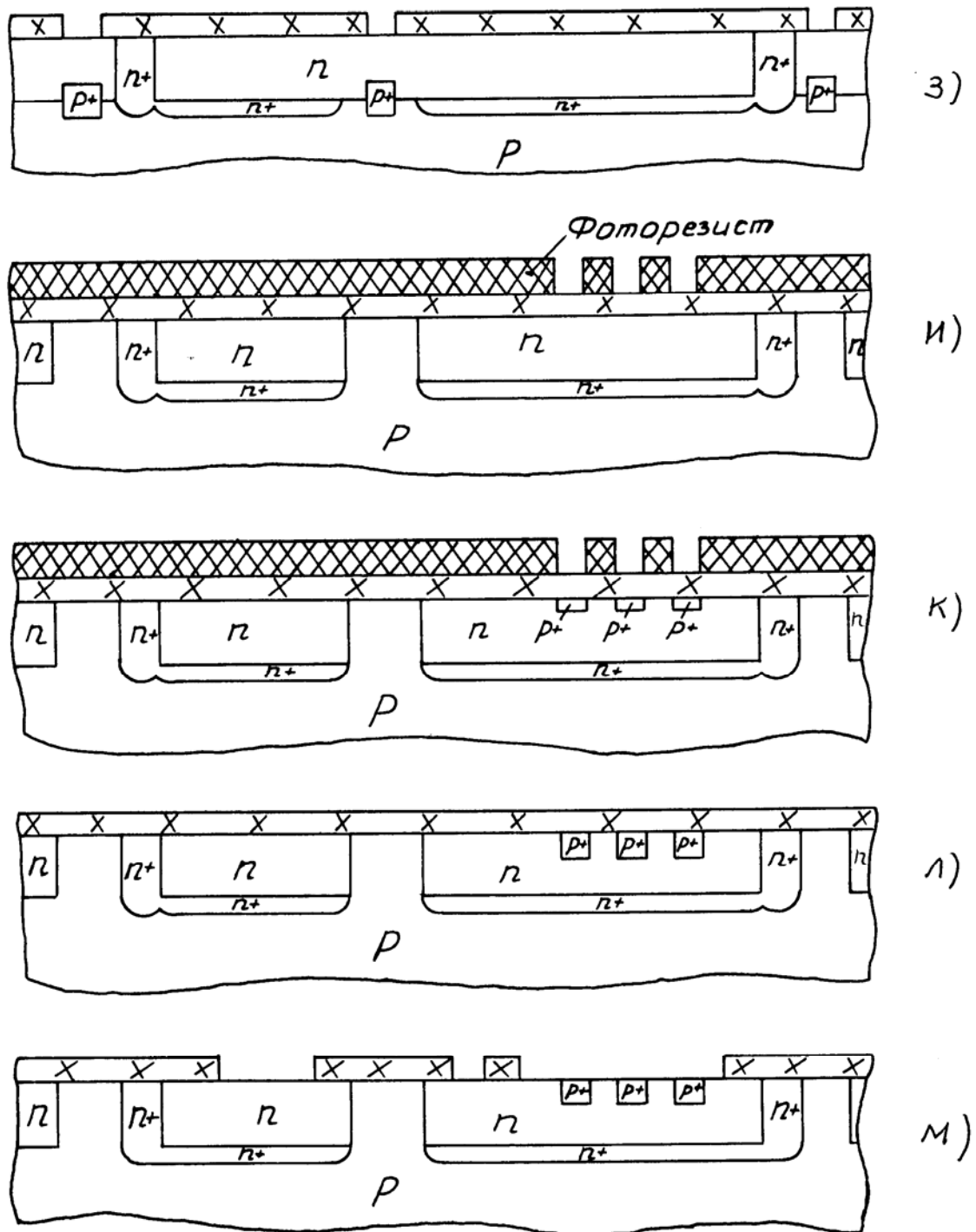


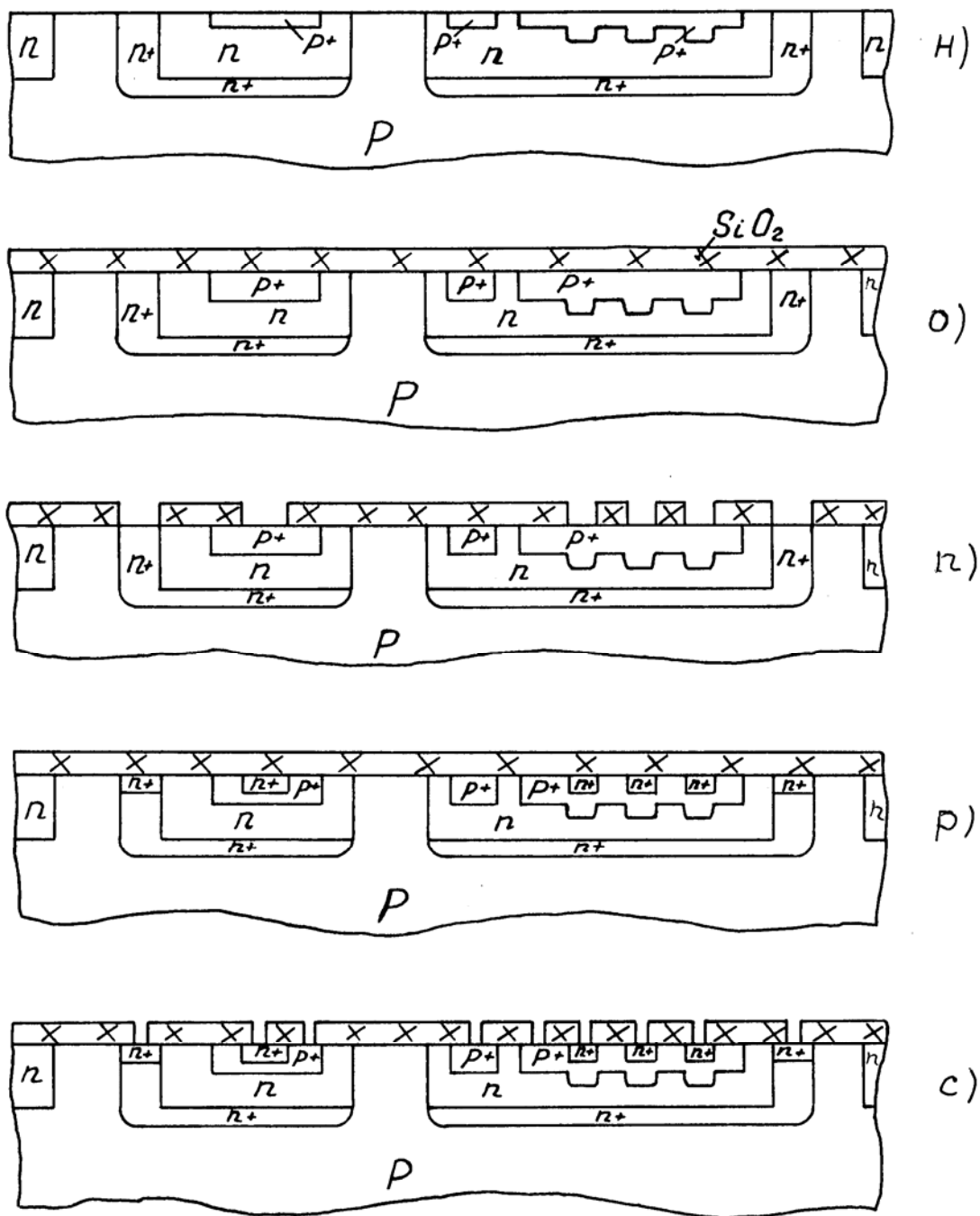
Рис. 2. Фрагменты поэтапного формирования структуры БИС 1051ХА3:

- а – окисление исходной пластины;
- б – фотолитография 1 по слою SiO<sub>2</sub> перед диффузией сурьмы;
- в – 2-я стадия диффузии сурьмы для формирования скрытых n<sup>+</sup> - слоев;
- г – ионное внедрение бором для формирования донной части разделительных p<sup>+</sup>-областей;
- д – эпитаксиальное наращивание n – слоя кремния;
- е – фотолитография 3 для вскрытия окон перед диффузией фосфора;
- ж – 2-я стадия диффузии фосфора для формирования вертикальных n<sup>+</sup>- слоев;



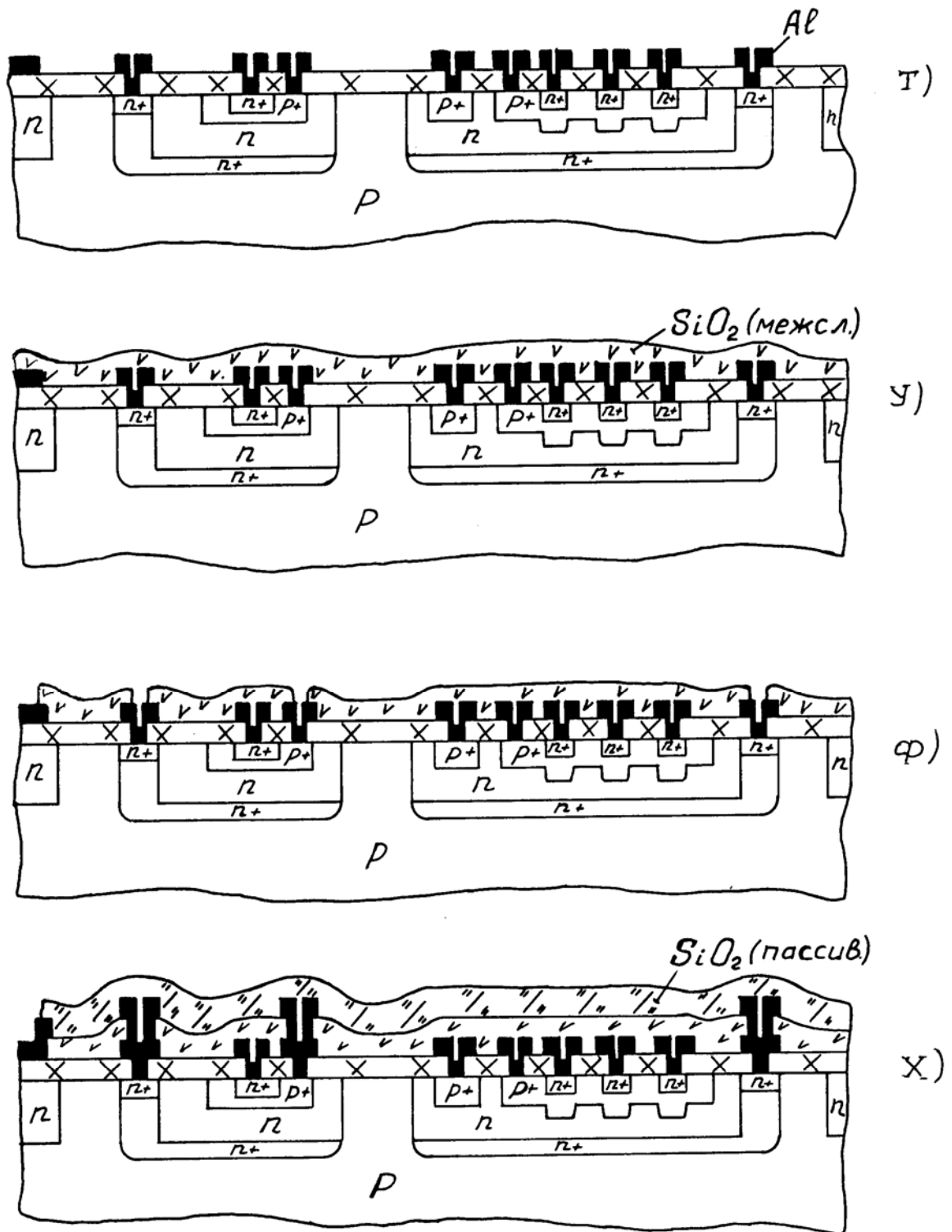
Продолжение рисунка 2:

- з – фотолитография 4 под диффузию бора (перед формированием разделительных областей);
- и – фотолитография 5 под ионное легирование бором;
- к – ионное легирование бором для формирования  $p^+$ - областей инжекционных элементов;
- л – термообработка пластин с удаленным фоторезистом после ионного легирования бором;
- м – фотолитография 6 под диффузию бора (перед формированием базовых областей и  $p^+$ - областей инжекционных элементов);



Продолжение рисунка 2:

- n – удаление боросиликатного стекла и SiO<sub>2</sub> после 1-й стадии диффузии бора (для формирования базовых областей и p<sup>+</sup>- областей инжекционных элементов);
- o – 2-я стадия диффузии бора для формирования базовых областей и p<sup>+</sup>- областей инжекционных элементов с окислением пластин;
- p – фотолитография 7 под диффузию фосфора (перед формированием n<sup>+</sup>- областей);
- r – окисление после 1-й стадии диффузии фосфора (для формирования эмиттерных, коллекторных приконтактных областей и n<sup>+</sup>- областей инжекционных элементов);
- c – фотолитография 8 для вскрытия окон под контакты к элементам БИС;



Окончание рисунка 2:

- т – фотолитография 9 по слою металлизации для формирования 1-го уровня коммутации;
- у – плазмохимическое осаждение межслойной изоляции;
- ф – фотолитография 10 по межслойному диэлектрику для обеспечения межслойной коммутации;
- х – фотолитография 12 по слою пассивации для вскрытия окон к контактным площадкам БИС.

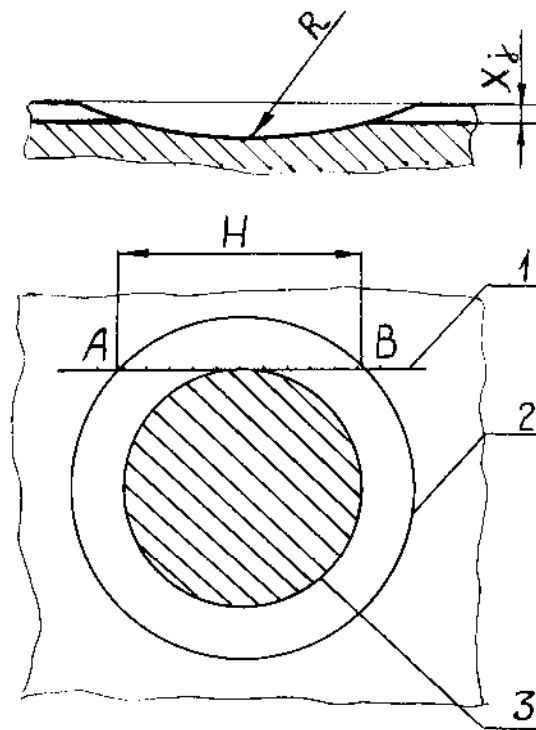


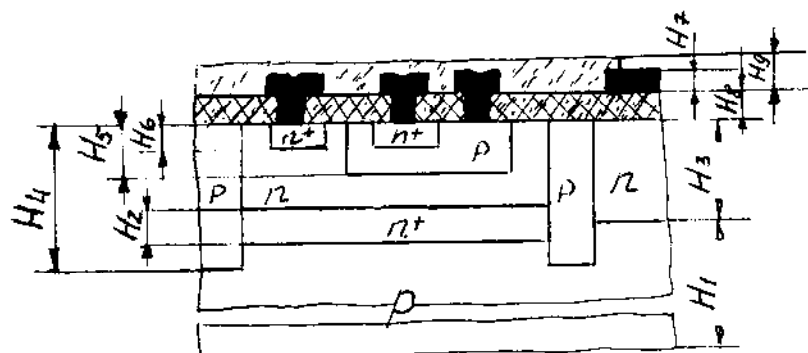
Рис. 3. К определению толщины эпитаксиальных и диффузионных слоев с помощью шарового шлифа ( $AB=H$  - хорда):

- 1 – микрометрическая линия окулярного микрометра;
- 2 – контур шарового шлифа, подготовленного к измерениям;
- 3 – граница раздела 2-х областей в кремнии, отличающихся типом проводимости.

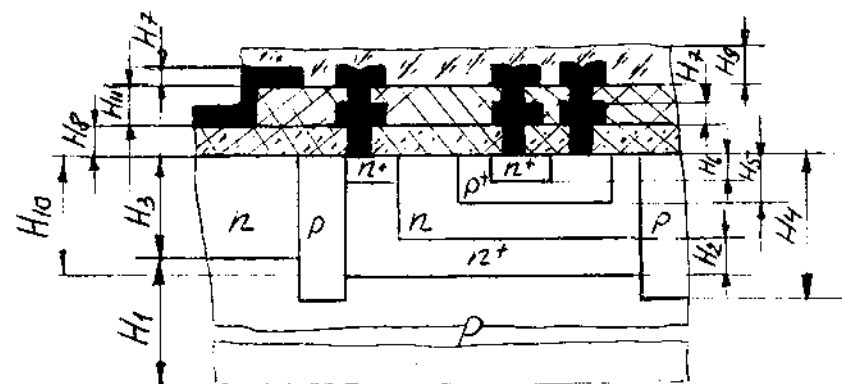


Таблица 1

## Основные сведения об элементах структур полупроводниковых ИС и БИС



ИС типа 1331A3



БИС типа 1051XA3

Элементы структуры	Тип проводимости	Основные технологические материалы для получения элементов структуры	Толщина элементов структуры (мкм) и обозначение	Удельное поверхностное сопротивление (Ом/□)	Примечания
1	2	3	4	5	6
Подложка из монокристаллического кремния	p	Очищенный поликристаллический Si, легирующая примесь – бор	$H_1 = 525 \pm 25$	-	КДБ-10 получают направленной кристаллизацией на затравку из объема расплава основных технологических материалов (поликристаллического кремния и легирующей примеси)
Скрытый слой	$n^+$	Сурьма кристаллическая	$H_2 = 3,5 \pm 0,2$	$25 \pm 5$	Получают диффузией
Эпитаксиальный слой	n	$SiCl_4$ и $H_2$	$H_3 = 7,9 \pm 0,2$	-	Осаждение из газовой фазы (хлоридный метод)
Разделительная область	p	$BBr_3$	$H_4 = 10 \pm 0,2$	$90 \pm 8$	Получают диффузией (для ИС); сочетанием ионного легирования и диффузии (для БИС)

1	2	3	4	5	6
Базовая область	p <sup>+</sup> (p) <sup>*</sup>	BBr <sub>3</sub>	H <sub>5</sub> = 1,65 ± 0,1	180 ± 10 (110 ± 10) <sup>***</sup>	Получают диффузией (для ИС); для БИС с инъекционными элементами получают ионным легированием и диффузией
Эмиттерная область	n <sup>+</sup>	POCl <sub>3</sub>	H <sub>6</sub> = 1,2 ± 0,1	9 ± 1	Получают диффузией
Слой металлизации	-	Сплав (Al + 1,2% Si)	H <sub>7</sub> = 0,6 ± 0,1 (1,0 ± 0,1) <sup>**</sup>	-	Наносят в вакууме, например, методом ионно-плазменного распыления
Изолирующий слой SiO <sub>2</sub>	-	O <sub>2</sub> – сухой, пары воды	H <sub>8</sub> = 0,8 ± 0,05 (0,6 ± 0,05) <sup>***</sup>	-	Термическое окисление кремния
Пассивирующий слой ФСС	-	SiH <sub>4</sub> , PH	H <sub>9</sub> = 0,7 ± 0,05	-	Осаждение из газовой фазы (пиролиз)
Вертикальный слой	n <sup>+</sup>	POCl <sub>3</sub>	H <sub>10</sub> = 6,8 ± 0,2	45 ± 5	Получают диффузией
SiO <sub>2</sub> межслойной изоляции	-	Si(OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> , O <sub>2</sub>	H <sub>11</sub> = 1,0 ± 0,1	-	Плазмохимическое осаждение

• - тип проводимости для ИС;

\*\* - для 2-го слоя металлизации;

\*\*\* - для БИС.

Таблица 2

## Зависимость цвета термически выращенной пленки двуокиси кремния от ее толщины

Порядок интерференции	Толщина пленки, мкм.	Цвет пленки	Порядок интерференции	Толщина пленки, мкм.	Цвет пленки
1	0,05	Бежевый	3	0,47	Фиолетовый
	0,07	Коричневый		0,48	Голубовато – фиолетовый
	0,10	Темно –фиолетовый		0,49	Голубой
	0,12	Голубой		0,50	Голубовато – зеленый
	0,15	Светло-голубой		0,52	Зеленый
	0,17	Металлический		0,54	Темновато – зеленый
	0,20	Светло –золотистый		0,56	Зеленовато – желтый
	0,22	Золотистый		0,57	Желтый
	0,25	Оранжевый		0,58	Светло – оранжевый
	0,27	Красно – фиолетовый		0,60	Телесно – розовый
2			4	0,63	Фиолетово – красный
	0,30	Фиолетово – голубой		0,68	Голубоватый
	0,31	Голубой		0,72	Голубовато – зеленый
	0,32	Зелено – голубой		0,77	Желтоватый
	0,34	Светло-зеленый		0,80	Оранжевый
	0,35	Зеленый		0,83	Желтовато – розовый
	0,36	Темно – зеленый		0,85	Светло – красновато – фиолетовый
	0,37	Зеленовато – желтый			
	0,39	Желтый			
	0,41	Светло – оранжевый			
	0,42	Телесно – розовый			
	0,44	Фиолетово – красный			
0,46	Красно – фиолетовый				

Форма таблицы 3

Технологические операции изготовления полупроводниковой ИС (133ЛА3)

Изделие 1

Вариант

№№ п. п.	Наименование операции, выполненной на образце	Номер операции в табл. П.1.	Виды брака	Причины брака	Номер образца в кассете

Форма таблицы 4

Технологические операции изготовления полупроводниковой БИС (1051ХА3)

Изделие 2

Вариант

№№ п. п.	Наименование операции, выполненной на образце	Номер операции в табл. П.1.2	Виды брака	Причины брака	Номер образца в кассете

Форма таблицы 5

Результаты определения толщины диффузионного слоя

Образец № 2 ( Кассета 1)	Толщина диффузионного слоя, X <sub>1</sub> мкм
Образец с шаровым шлифом	

Форма таблицы 6

Результаты определения толщины окисла

Образец № 2 ( кассета 1 )	Цвет	Порядок интерференции	Толщина окисла, мкм	Назначение данного окисла в ИС (БИС)
Образец с клином травления в SiO <sub>2</sub>				

### ***Описание лабораторного макета***

Для выполнения лабораторной работы используются:

1. Микроскоп типа ММУ-3.
2. Две кассеты с макетными образцами. Кассета 1 содержит: три образца, отобранные после резки слитка, механической шлифовки и полировки пластин кремния; семь образцов – после выполнения различных операций технологического процесса изготовления цифровой ИС типа 133ЛА3; два образца (№ 11 и 12), предназначенные для измерения параметров слоев ИС. Кассета 2 содержит: 12 образцов, отобранных после выполнения различных операций технологического процесса изготовления цифро-аналоговой БИС типа 1051ХА3.

Для удобства в работе и возможности размещения в кассетах, макетные образцы изготавливались из рабочих пластин диаметром 100 мм с применением скрайбирования и ломки пластин. Приступая к работе, следует помнить, что макетные образцы очень хрупки, поэтому после рассмотрения их следует сразу же размещать в кассете. О замеченных поломках следует сообщить преподавателю.

### ***Требования к отчету***

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- краткие теоретические сведения;
- результаты выполнения лабораторного задания, сведенные в формы таблиц 3, 4, 5, 6;
- фрагмент эскиза фотошаблона (вид сверху и сбоку) с видом структуры полупроводниковой ИС или БИС, для которой используется данный фотошаблон;
- выводы по работе, отражающие возможные причины брака при изготовлении микросхем на биполярных транзисторах.

### ***Лабораторное задание***

#### *Домашнее задание*

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить формы таблиц 3 – 6 для записи результатов.
3. Подготовить начальную часть отчета, содержащую: титульный лист, цель работы, краткие теоретические сведения.
4. Подготовиться к ответам на контрольные вопросы.
5. Для выполнения лабораторной работы необходимо иметь: калькулятор, линейку, карандаш, ластик.

#### *Работа в лаборатории*

1. Изучить последовательность операций при изготовлении полупроводниковых микросхем.
2. Изучить технологические операции производства полупроводниковых микросхем.
3. Измерить параметры слоев полупроводниковой микросхемы.
4. Изобразить эскиз фотошаблона (вид сверху и сбоку), необходимого для выполнения заданной фотолитографии.
5. Ознакомиться с оборудованием и материалами, применяемыми в

производстве полупроводниковых микросхем на биполярных транзисторах.

### ***Порядок выполнения работы***

Работа может выполняться в соответствии с несколькими заданиями.

#### ***I. Изучение последовательности операций процесса изготовления полупроводниковых микросхем.***

1. Определить наименование операции, выполненных на пластинах 1 – 10 изделия 1. Для этого необходимо:

- получить у лаборанта две кассеты с макетными образцами;
- включить микроскоп, настроить его и с его помощью внимательно рассмотреть образцы 1-10 изделия 1, при этом расположить рассмотренные образцы в последовательности выполнения операций, указанных в табл. П.1. и с учетом последовательности изготовления самих подложек (пластин).

*Примечания.* 1) При выборе последовательности операций следует учитывать усложнение рисунка на примере простейшего транзистора и увеличение количества фигур совмещения.

2) Следует запомнить цвет чистого кремния, поместив полированный образец в поле обзора микроскопа.

3) Цвет окисла может быть различным в зависимости от его толщины. Однако, области, формируемые одновременно при высокой температуре (выше 900<sup>0</sup>С в открытой или полукрытой системе), имеют всегда одинаковый цвет окисла.

4) Если на образце выполнена одна из фотолитографий по слою окисла (с травлением окисла для вскрытия в нем окон к поверхности кремния), то в поле обзора микроскопа будут видны области чистого кремния.

2. Наименование операций, в последовательности от самой простой структуры ИС (из имеющихся образцов) до полностью изготовленной структуры ИС занести в форму таблицы 3.

*Примечания.* 1) Образцы, представляющие процесс изготовления пластин, кассеты №1 рассмотреть и описать в последовательности: резка слитка кремния на пластины, механическая шлифовка пластин кремния, механическая полировка пластин кремния.

2) Правильное наименование операций для образцов с элементами структуры ИС указано в таблице П.1.

3) Образцы 11 и 12 (контрольные) при определении наименования и последовательности операций не рассматривать.

3. Аналогично п.1 определить наименование и последовательность технологических операций, выполненных на образцах 1 – 12 изделия 2 (кассеты № 2), пользуясь сведениями таблицы П.2.

4. Наименование операций в последовательности от простой структуры до полностью изготовленной структуры БИС занести в форму таблицы 4.

#### ***II. Изучение технологических операций производства полупроводниковых микросхем.***

1. Виды и причины брака занести в форму таблиц 3 и 4, используя сведения таблицы П.2.

*Примечание.* Допускается для каждой операции указать один из видов брака и его причину, однако, повторение описания одних и тех же дефектов для аналогично выполняемых операций нежелательно.

2. Изобразить фрагмент эскиза фотошаблона (вид сверху и сбоку) для одной из фотолитографий, заданных в соответствии с вариантом :

- для вариантов 1-7, соответственно фотолитографии 1-7 изделия 1 (см. рис. 1 и табл.П.1);

- для вариантов 8-14, соответственно фотолитографии 1-4 и 9, 10, 12 изделия 2 (см. рис. 2 и табл.П.2.).

*Примечание.* Фрагмент эскиза фотошаблона изобразить с учетом:

1) применения позитивного фоторезиста;

2) вида структуры полупроводниковой ИС или БИС (найти на рис.26 или рис.27 заданный вариантом вид структуры и изобразить его) ;

3) включения в фрагмент эскиза фотошаблона необходимых для данной фотолитографии топологических элементов структуры ИС или БИС (с сохранением их геометрических пропорций на фотошаблоне).

### *III. Измерение параметров слоев полупроводниковой микросхемы.*

1. Определить толщину диффузионного слоя по глубине залегания p-n перехода ( $X_j$ ) в кремнии, для этого:

- разместить образец 11 (из кассеты 1) так, чтобы в поле зрения микроскопа была видна лунка шарового шлифа;

- трижды измерить значения  $H$  (см .рис. 28) для лунки шарового шлифа (радиально поворачивая под микроскопом образец и измеряя  $H_1, H_2, H_3$ ) и занести результаты измерений в форму таблицы 5;

- рассчитать значения  $X_{j1}, X_{j2}$  и  $X_{j3}$  по формуле  $X_j = \frac{H^2 n^2}{8R}$ , где  $H$  – размер хорды в делениях шкалы окуляра микроскопа,  $n$  – цена деления для данного объектива в мкм,  $R$  – радиус шара приспособления для изготовления шарового шлифа в мкм, и определить  $X_{j\text{средн.}}$  по формуле  $\sum_{i=1}^{i=3} X_{ji} / 3$ ;

- результаты расчетов занести в форму таблицы 5.

2. По цвету пластины №12 определить толщину слоя окисла ( $h_{\text{SiO}_2}$ ), используя табл.2 с учетом порядка интерференции.

3. Результаты выполнения п.2 занести в форму таблицы 6.

### ***Контрольные вопросы***

1. Какова последовательность операций изготовления полупроводниковой ИС?
2. Изобразите сечение полупроводниковой ИС после заданной операции: разделительной диффузии, фотолитографии, пассивации и т.п.
3. Назначение фотошаблонов, технология их изготовления. Изобразите фрагмент эскиза фотошаблона для одной из операций полупроводниковой микросхемы.
4. Охарактеризуйте отдельные операции технологического процесса изготовления полупроводниковой ИС: фотолитографию, окисление, диффузию и т.п.
5. Каково назначение скрытого слоя, вертикального слоя, разделительной области и других элементов полупроводниковой ИС?

6. Назовите виды брака, которые могут наблюдаться на пластинах и каковы причина их появления?
7. Какие виды технологического брака Вам известны?
8. С какой целью проводится двухстадийная диффузия?
9. Почему приконтактные области n-Si – металл легируются до  $n^+$ ?
10. Почему изолирующие слои  $\text{SiO}_2$  на поверхности полупроводниковой БИС получают с применением разных технологий?
11. На какой операции формируются резисторы полупроводниковой ИС?
12. С какой целью эмиттер легируется до  $n^+$ ?
13. Каково назначение фоторезиста и почему в данной работе для ИС и БИС использовались разные фоторезисты?
14. Из каких соображений выбирается толщина подложки и эпитаксиального слоя?
15. Из каких соображений выбирается удельное сопротивление подложки и эпитаксиального слоя?
16. Для чего нужен эпитаксиальный слой? Почему коллекторный слой не формируют просто диффузией, а наращивают эпитаксией?
17. Каково назначение перемычек в полупроводниковой ИС и каким образом они формируются?
18. С какой целью в изделии 2 используется ионное легирование?
19. Каким образом реализуется структура  $n^+$ -p-n и  $p^+$ -n-p транзисторов в p-типа подложке?
20. С какой целью термическое окисление проводят по системе: сухой  $\text{O}_2$  – пары воды – сухой  $\text{O}_2$ ?
21. Какие пленки в технологии полупроводниковой ИС называются эпитаксиальными? Назовите методы эпитаксиального наращивания.
22. Изобразите распределение примеси в диффузионном слое по его глубине для одно- и двухстадийной диффузии.



## Приложение 5.

*Таблица П.1.*

*Основные операции технологического маршрута для изготовления структуры ИС на биполярных транзисторах  
(Изделие 1 – 133ЛА3).*

№№ п.п.	Наименование операции	Контролируемые параметры технологической среды (ТС)	Контролируемые параметры объекта производства	Материалы технологических и защитных сред	Технологическое оборудование
1	2	3	4	5	6
1 .	Химическая обработка пластин кремния (тип КДБ-10) .	Время (t) обработки в разных средах. Температура (Т) ТС.	Внешний вид пластин после очистки (по количеству светящихся точек в темном поле микроскопа)	Толуол, смесь Каро (смесь $H_2SO_4$ и $H_2O_2$ ), перекисно-аммиачная смесь; вода деионизованная марки А, кислота фтористоводородная, спирт этиловый ректификат; батист отбеленный мерсеризованный.	Линия «Лада-Электроника» для хим. обработки; микроскоп, например, типа НУ-2Е.
2 .	Окисление пластин кремния (выращивание $SiO_2$ ) по системе: сухой $O_2$ – пары воды – сухой $O_2$ при $T=1050^{\circ}C$	T, t, расход газов (Мг)	Толщина окисла (h)	Кислород газообразный, азот газообразный, вода деионизованная марки А (при необходимости 10% HF), фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Печь диффузионная типа ДОМ; прибор для измерения толщины окисла, например, эллипсометр.

Продолжение табл. П.1.

1	2	3	4	5	6
3 .	<p>Фотолитография 1 для вскрытия окон под диффузию сурьмы:</p> <p>а) подготовка поверхности пластин;</p> <p>б) нанесение фоторезиста (ФР);</p> <p>в) сушка слоя ФР;</p> <p>г) совмещение и экспонирование;</p> <p>д) проявление ФР;</p> <p>е) задубливание;</p> <p>ж) травление SiO<sub>2</sub>;</p> <p>з) удаление ФР.</p>	<p>T, t, M<sub>ж</sub>(расход жидких химреактивов), c(доза фоторезиста при нанесении) ,n<sub>ц</sub>(число оборотов центрифуги в минуту),</p>	<p>Внешний вид, линейные размеры.</p>	<p>Фоторезист позитивный ФП-РН-7, диметилформаид, гексаметилдисизалан (адгезив для фоторезиста), травильный раствор.(для травления SiO<sub>2</sub>), раствор для проявления (0,6% КОН), вода деионизованная марки А, смесь Каро, спирт этиловый ректификат; фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный</p>	<p>Линия фотолитографии «Лада – Электроника»; микроскоп УИМ – 25</p>
4 .	<p>Диффузия сурьмы для формирования скрытых n+ - слоев:</p> <p>а) 1-я стадия диффузии (загонка примеси при T=1150°C);</p> <p>б)удаление сурьмяносиликатного стекла;</p> <p>в) 2-я стадия диффузии (разгонка примеси в глубь полупроводника при T=12000C)</p>	<p>T, t, Mg</p>	<p>Внешний вид, Уд. пов. сопр. ρ<sub>s</sub> , глубина залегания p-n перехода (толщина диффузионного слоя ) X<sub>j</sub></p>	<p>Азот газообразный (или аргон), сурьма кристаллическая (в ампулах), раствор для выявления p-n перехода, травильный раствор, спирт этиловый ректификат, вода деионизованная марки А; батист отбеленный мерсеризованный, фильтр обеззоленный, алмазная паста (на основе тонкого микропорошка)</p>	<p>Печь диффузионная типа ДОМ; установка для измерения ρ<sub>s</sub> (четырёхзондовая) типа ЦИУС; микроскоп типа МИМ-7; установка для получения шарового шлифа; модуль (для травления пластин) из линии хим. обработки "Лада - Электроника".</p>

Продолжение табл. П.1.

1	2	3	4	5	6
5.	Удаление SiO <sub>2</sub> с поверхности пластин (после диффузии сурьмы).	T, t	Внешний вид	Травитель (65% HF), вода деионизованная марки А; батист отбеленный мерсеризованный.	Модули линии фотолитографии "Лада - Электроника"
6.	Эпитаксиальное наращивание слоя кремния (n - Si) при T=1200 <sup>0</sup> C.	T, t, M <sub>r</sub>	Толщина эпитакс. слоя α,	Тетрахлорид кремния, водород газообразный,	Установка эпитаксиального наращивания типа «Эпиквар»;
7.	Окисление пластин кремния по системе: сухой O <sub>2</sub> - пары воды - сухой O <sub>2</sub> (при T=1100 <sup>0</sup> C).	Аналогично операции 2			
8.	Фотолитография 2 для вскрытия окон под диффузию бора (перед формированием разделительных областей): а) подготовка поверхности пластин; б) нанесение фоторезиста (ФР); в) сушка слоя ФР; г) совмещение и экспонирование; д) проявление ФР; е) задубливание ФР; ж) травление SiO <sub>2</sub> ; з) удаление ФР.	Аналогично операции 3			
		Аналогично операции 3			

Продолжение табл. П.1.

1	2	3	4	5	6
9 .	<p>Диффузия бора для формирования разделительных р - областей:</p> <p>а) 1-я стадия диффузии (загонка примеси при <math>T=950^{\circ}\text{C}</math> );</p> <p>б) удаление боросиликатного стекла (БСС) и <math>\text{SiO}_2</math>;</p> <p>в) 2-я стадия диффузии (разгонка примеси с одновременным окислением пластин по системе: сухой <math>\text{O}_2</math> - пары воды - сухой <math>\text{O}_2</math> при <math>T=1150^{\circ}\text{C}</math> ).</p>	<p><math>T, t, M_r</math></p>	<p>Внешний вид , <math>\rho_s, X_j</math></p>	<p>Трехбромистый бор, азот газообразный, кислород газообразный, раствор для выявления р-п перехода, травильный раствор, спирт этиловый ректификат, вода деионизованная марки А; батист отбеленный мерсеризованный.</p>	<p>Аналогично операции 4</p>
10 .	<p>Фотолитография 3 для вскрытия окон под диффузию бора (перед формированием базовых р-областей).</p>	<p>Аналогично операции 3 , а - з</p>			

Продолжение табл. П.1.

1	2	3	4	5	6
11 .	Диффузия бора для формирования базовых p - областей: а) 1-я стадия диффузии (загонка примеси при T=950 <sup>0</sup> C) ; б) удаление БСС; в) 2-я стадия диффузии (разгонка примеси в сухом O <sub>2</sub> при T=1150 <sup>0</sup> C).	Аналогично операции 9			
12 .	Фотолитография 4 для вскрытия окон под диффузию фосфора.	Аналогично операции 3 , а - з			
13 .	Диффузия фосфора для формирования эмиттерных и приконтактных коллекторных n <sup>+</sup> - областей: а) 1-я стадия (загонка примеси при T=1000 <sup>0</sup> C) ; б) термообработка в сухом кислороде (при T=1000 <sup>0</sup> C).	T, t, M <sub>г</sub>	Внешний вид, ρ <sub>s</sub> , X <sub>j</sub>	Хлорокись фосфора (POCl <sub>3</sub> ), кислород газообразный, травильный раствор, спирт этиловый ректификат, вода деионизованная марки А; фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Печь диффузионная типа ДОМ; установка для измерения ρ <sub>s</sub> (четырёхзондовая) типа ЦИУС; микроскоп типа МИМ-7; модуль (для травления пластин) из линии хим. обработки "Лада-Электроника"
14 .	Фотолитография 5 для вскрытия окон под контакты к элементам ИС.	Аналогично операции 3 , а - з .			

Продолжение табл. П.1.

1	2	3	4	5	6
15 .	Нанесение в вакууме слоя металлизации.	р, параметры, определяющие режим осаждения слоя металлизации	Внешний вид, толщина слоя металлизации.	Мишень из сплава Al-(1,2%)Si, аргон газообразный, азот жидкий, сжатый воздух.	Установка вакуумного напыления "Оратория-5"; многолучевой интерферометр типа МИСС.
16 .	Фотолитография 6 по слою металлизации для формирования коммутации элементов ИС.	Аналогично операции 3, а – з.	Внешний вид, линейные размеры; ВАХ по тестовым структурам.	Фоторезист позитивный ФП-РН-7, диметилформамид, гексаметилдисизалан, травильный раствор (для травления сплава Al-Si); раствор для проявления, вода деионизованная марки А, спирт этиловый ректификат; фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Линия фотолитографии "Лада-Электроника"; микроскоп типа УИМ-25; специальный стенд с многозондовой головкой для измерения ВАХ.
17 .	Осаждение из газовой фазы (или пиролитическое) пассивирующего слоя ФСС при T=450 <sup>0</sup> C).	T, t, M <sub>r</sub>	Внешний вид, h SiO <sub>2</sub> .	Фосфин (PH <sub>3</sub> ), моносилан (SiH <sub>4</sub> ), аргон газообразный, кислород газообразный, спирт этиловый ректифицированный; батист отбеленный мерсеризованный.	Установка типа "Изотрон"; интерферометр типа МИИ-4.
18 .	Фотолитография 7 в слое ФСС для вскрытия окон к контактными площадкам ИС.	Аналогично операции 3, а – з.			

Продолжение табл. П.1.

1	2	3	4	5	6
19.	Термообработка пластин для вжигания металлизации (при T=450 <sup>0</sup> C).	T, t, M <sub>r</sub>	Внешний вид	Азот газообразный.	Печь диффузионная типа ДОМ; микроскоп типа НУ-2Е.
20.	Функциональный контроль и разбраковка ИС.	Выходные параметры измерительных установок.	Электрические параметры ИС*.	Краска маркировочная, спирт этиловый ректификат, батист отбеленный мерсеризованный.	Измерительные установки для контроля и разбраковки ИС.

\* Электрические параметры ИС - статические и динамические параметры по техническим условиям

**Таблица П.2.**

**Основные операции технологического маршрута для изготовления структуры БИС на биполярных транзисторах (Изделие 2 - 1051ХА3)**

№№ п.п.	Наименование операции	Контролируемые параметры технологической среды (ТС)	Контролируемые параметры объекта производства	Материалы технологических и защитных сред	Технологическое оборудование
1	2	3	4	5	6
1.	Химическая обработка пластин кремния (тип КДБ-10) с целью очистки их поверхности.	Время (t) обработки в разных средах. Температура (Т) ТС.	Внешний вид пластин после очистки (по количеству светящихся точек в темном поле микроскопа).	Толуол, смесь Каро*, перекисно-аммиачная смесь; вода деионизованная марки А, кислота фтористоводородная, спирт этиловый ректификат; батист отбеленный мерсеризованный.	Линия "Лада-Электроника" для хим. обработки; микроскоп, например, типа НУ-2Е.

1	2	3	4	5	6
2 .	Окисление пластин (выращивание $\text{SiO}_2$ ) по системе: сухой $\text{O}_2$ - пары воды - сухой $\text{O}_2$ при $T=1050^\circ\text{C}$ .	$T, t$ , расход газов ( $M_r$ )	Толщина окисла (h)	Кислород газообразный, азот газообразный, вода деионизованная марки А, (при необходимости 10% HF), фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Печь диффузионная типа ДОМ; прибор для измерения толщины окисла, например, эллипсометр.
3 .	Фотолитография 1 для вскрытия окон под диффузию сурьмы (перед формированием скрытых $n^+$ - слоев ) : а) подготовка поверхности пластин ; б) нанесение фоторезиста (ФР) ; в) сушка слоя ФР ; г) совмещение и экспонирование ; д) проявление ФР ; е) задубливание ; ж) травление $\text{SiO}_2$ ; з) удаление ФР.	$T, t, M_{\text{ж}}^*$ $c^{**}, \Pi_{\text{ц}}^{***}$ $T, t$ $t$ $T, t$ $t$ $T, t$	Внешний вид, линейные размеры.	Фоторезист позитивный ФП-051МК, этилцеллозольвацетат, гексаметилдисизалан, травильный раствор (для травления $\text{SiO}_2$ ), раствор для проявления (0,6% KOH), вода деионизованная марки А, смесь Каро, спирт этиловый ректификат; фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Линия фотолитографии "Лада - Электроника"; микроскоп типа УИМ-25.



1	2	3	4	5	6
4 .	<p>Диффузия сурьмы для формирования скрытых <math>n^+</math> - слоев:</p> <p>а) 1-я стадия диффузии (загонка примеси при <math>T=1150^{\circ}\text{C}</math>);</p> <p>б)удаление сурьмяносиликатного стекла;</p> <p>в) 2-я стадия диффузии (разгонка примеси вглубь полупроводника) с выращиванием <math>\text{SiO}_2</math> в сухом <math>\text{O}_2</math> при <math>T=1200^{\circ}\text{C}</math>.</p>	T, t, $M_T$	Внешний вид, уд. пов. сопр. $\rho_s$ , глубина залегания p-n перехода (толщина диффузионного слоя) $X_j$	Кислород газообразный, азот газообразный (или аргон), сурьма кристаллическая (в ампулах), раствор для выявления p-n перехода, травильный раствор, спирт этиловый ректификат, вода деионизованная марки А; батист отбеленный мерсеризованный, фильтр обеззоленный, алмазная паста (на основе тонкого микропорошка).	Печь диффузионная типа ДОМ; установка для измерения $\rho_s$ (четырёхзондовая) типа ЦИУС; микроскоп типа МИМ-7; установка для получения шарового шлифа; модуль (для травления пластин) из линии хим. обработки "Лада - Электроника".
5 .	<p>Фотолитография 2 для вскрытия окон в ФР под ионное легирование бором (перед формированием донной части разделительных <math>p^+</math>-областей).</p>	Анало - гично операции 3 п.п. а - з	Внешний вид	Фоторезист позитивный типа ФП-051МК, этилцеллозольвацетат, гексаметилдисилазан, травильный раствор (для травления $\text{SiO}_2$ ), раствор для проявления (0,6 % КОН), вода деионизованная марки А, спирт этиловый ректификат; фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Линия фотолитографии "Лада-Электроника".

Продолжение табл. П.2.

1	2	3	4	5	6
6 .	Ионное легирование бором (формирование донной части разделительных $p^+$ -областей).	* $p$ (), **Д, *** пар. ионного пучка.	Контроль отсутствует	Трехбромистый бор, спирт этиловый ректификат; батист отбеленный мерсеризованный.	Установка для ионного легирования типа "Лада - 30".
7 .	Удаление ФР.		Внешний вид	Смесь Каро, вода деионизованная марки А, батист отбеленный мерсеризованный	Модули линии фотолитографии "Лада-Электроника"
8 .	Удаление $SiO_2$		Внешний вид	Травитель (65% HF), вода деионизованная марки А ; батист отбеленный мерсеризованный.	Модули линии фотолитографии "Лада-Электроника"
9 .	Эпитаксиальное наращивание слоя кремния (n - Si) при $T=1200^{\circ}C$ .		Толщина эпитаксиального слоя $\alpha$ , уд. об. сопр. $\rho_v$ , плотность дислокаций (дефектов упаковки, линий скольжения).	Тетрахлорид кремния, водород газообразный, азот газообразный, хлор газообразный, травитель для выявления дислокаций, вода деионизованная марки А, спирт этиловый ректификат; батист отбеленный мерсеризованный.	Установка эпитаксиального наращивания типа "Эпиквар"; установка измерения удельного объемного сопротивления $\rho_v$ - ЦИУС ; многолучевой интерферометр типа МИСС; микроскоп типа МИМ-7.

\* $p$  - остаточное давление в рабочей камере ; \*\*\*Д - доза ионов; \*\*\* пар. - параметры ионного пучка : ток ионного пучка , диаметр ионного пучка , энергия ускоренных ионов , качество сканирования.

1	2	3	4	5	6
10 .	Окисление пластин (по системе сухой $O_2$ - пары воды - сухой $O_2$ ).	Аналогично операции 2.			
11 .	Фотолитография 3 для вскрытия окон под диффузию фосфора (перед формированием вертикальных $n^+$ -областей).	Аналогично операции 3, а – з.			
12 .	Диффузия фосфора для формирования вертикальных $n^+$ -областей: а) 1-я стадия диффузии (загонка примеси при $T=950^{\circ}C$ ); б) удаление фосфорносиликатного стекла (ФСС); в) удаление $SiO_2$ ; г) 2-я стадия диффузии (разгонка с выращиванием $SiO_2$ при $T=1050^{\circ}C$ ).	$T, t,$ $M_r$	Внешний вид, $\rho_s,$ $X_j$	Хлорокись фосфора ( $POCl_3$ ), кислород газообразный, азот газообразный, травильный раствор, спирт этиловый ректификат, вода деионизованная марки А; фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Печь диффузионная типа ДОМ; установка для измерения (четырёхзондовая) $\rho_s$ - типа ЦИУС; микроскоп типа МИМ-7; модуль (для травления пластин) из линии хим. обработки "Лада-Электроника".

1	2	3	4	5	6
13 .	Фотолитография 4 для вскрытия окон под диффузию бора (перед формированием разделительных р-областей).	Аналогично операции 3 , а – з.			
14 .	Диффузия бора для формирования разделительных р-областей: а) 1-я стадия диффузии (загонка примеси при $T=950^{\circ}\text{C}$ ); б) удаление боросиликатного стекла (БСС); в) удаление $\text{SiO}_2$ ; г) 2-я стадия диффузии (разгонка примеси с выращиванием $\text{SiO}_2$ в сухом $\text{O}_2$ при $T=1100^{\circ}\text{C}$ ).	Т, t, $M_{\Gamma}$	Внешний вид, $\rho_s, X_j$ .	Трехбромистый бор, азот газообразный, кислород газообразный, раствор для выявления р-п перехода, травильный раствор, спирт этиловый ректификат, вода деионизованная марки А; батист отбеленный мерсеризованный.	Аналогично операции 4
15 .	Фотолитография 5 для вскрытия окон в ФР под ионное легирование бором (перед формированием донных выступов $p^+$ -областей инжекционных элементов).	Аналогично операции 5.			
16 .	Ионное легирование бором для формирования донных выступов $p^+$ -областей инжекционных элементов.	Аналогично операции 6.			

1	2	3	4	5	6
17 .	Удаление фоторезиста и химическая обработка пластин.	Аналогично операции 7.			
18 .	Термообработка пластин после ионного легирования (для разгонки примеси (бора) и снижения дефектности структур легированных областей после ионного легирования при $T=1200^{\circ}\text{C}$ ).	Т, t	$\rho_s, X_j$	Травитель для $\text{SiO}_2$ , раствор для выявления p-n перехода, вода деионизованная марки А, спирт этиловый ректификат; фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный, алмазная паста.	Печь диффузионная типа ДОМ; модули линии для хим. обработки "Лада-Электроника"; установка для измерения $\rho_s$ -ЦИУС; установка для получения шар - шлифа.
19 .	Фотолитография б для вскрытия окон под диффузию бора (перед формированием базовых областей и $p^+$ - областей инжекционных элементов).	Аналогично операции 3, а – з.			
20 .	Диффузия бора для формирования базовых областей и $p^+$ -областей инжекционных элементов: а) 1-я стадия диффузии (загонка примеси при $T=9500\text{C}$ ); б) снятие БСС; в) снятие $\text{SiO}_2$ ; г) 2-я стадия диффузии (разгонка примеси при $T=11000\text{C}$ с выращиванием $\text{SiO}_2$ по системе: сухой $\text{O}_2$ - пары воды - сухой $\text{O}_2$ ).	Аналогично операции 14.			

1	2	3	4	5	6
21 .	Фотолитография 7 для вскрытия окон под диффузию фосфора (перед формированием $n^+$ -областей).	Аналогично операции 3, а – з.			
22 .	Диффузия фосфора для формирования $n^+$ -областей (эмиттерных, коллекторных приконтактных областей и $n^+$ -областей инжекционных элементов): а) 1-я стадия диффузии (загонка примеси при $T=950^{\circ}\text{C}$ ) ; б) окисление в сухом $\text{O}_2$ (при повышении температуры в рабочей зоне до $T=1000^{\circ}\text{C}$ ).	$T, t, M_r$	Внешний вид, $\rho_s$ , $X_j$ , $h \text{ SiO}_2$ .	Хлорокись фосфора ( $\text{POCl}_3$ ), кислород газообразный, азот газообразный (или аргон), раствор для выявления р - n перехода, травильный раствор, спирт этиловый ректификат, вода деионизованная марки А; батист отбеленный мерсеризованный, фильтр обеззоленный, алмазная паста (на основе тонкого микропорошка).	Аналогично операции 4.
23 .	Фотолитография 8 для вскрытия окон под контакты к элементам БИС.	Аналогично операции 3 , а – з.			
24 .	Нанесение (в вакууме) 1-го слоя металлизации.	$\rho$ , параметры, определяющие режим осаждения слоя металлизации	Внешний вид, толщина слоя металлизации.	Мишень из сплава Al-(1,2%) Si; аргон газообразный, азот жидкий, сжатый воздух.	Установка вакуумного напыления типа "Оратория-5"; многолучевой интерферометр типа МИСС.

Продолжение табл. П.2.

1	2	3	4	5	6
25 .	Фотолитография 9 по слою металлизации для формирования 1-го уровня коммутации элементов БИС.	Аналогично операции 3, а - 3 .	Внешний вид, линейные размеры; ВАХ по тестовым структурам.	Фоторезист ФП-051МК, этицеллозольвацетат, гексаметилдисилазан, травильный раствор (для травления сплава Al-Si); раствор для появления, вода деионизованная марки А, спирт этиловый ректификат; фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Линия фотолитографии "Лада-Электроника"; микроскоп типа УИМ-25; специальный стенд (с многозондовой головкой) для измерения ВАХ.
26 .	Плазмохимическое осаждение (ПХО) межслойной изоляции (межслойного диэлектрика - ПХО SiO <sub>2</sub> при T=400 <sup>0</sup> C).	M <sub>r</sub> , T, t	Внешний вид, h SiO <sub>2</sub> .	Тетраоксисилан (этилтриэтоксисилан), аргон газообразный, кислород газообразный.	Установка типа УВП-2М; интерферометр типа МИИ-4.
27 .	Фотолитография 10 по слою ПХО SiO <sub>2</sub> (вскрытие окон для межслойной коммутации).	Аналогично операции 3 , а – 3.			
28 .	Нанесение (в вакууме) 2-го слоя металлизации (с одновременным формированием межслойной коммутации).	Аналогично операции 24.			

Окончание табл. П.2.

1	2	3	4	5	6
29 .	Фотолитография 11 по слою металлизации для формирования 2-го уровня коммутации элементов БИС.	Аналогично операции 25.			
30 .	Осаждение из газовой фазы (или пиролитическое) пассивирующего слоя ФСС при $T=450^{\circ}\text{C}$ .	T, t, $M_r$	Внешний вид, $h \text{ SiO}_2$	Фосфин ( $\text{PH}_3$ ), моносилан ( $\text{SiH}_4$ ), аргон газообразный, кислород газообразный, спирт этиловый ректификат; батист отбеленный мерсеризованный.	Установка типа "Изотрон"; интерферометр типа МИИ-4.
31 .	Фотолитография 12 по слою пассивации для вскрытия окон к контактными площадкам БИС.	Аналогично операции 3 , а – з.			
32 .	Термоотжиг (для вжигания металлизации при $T=450^{\circ}\text{C}$ ).	T, t, $M_r$	Внешний вид.	Азот газообразный.	Печь диффузионная типа ДОМ; микроскоп типа НУ-2Е.
33 .	Функциональный контроль и разбраковка БИС.	Вых. пар-ры изм. уст-вок.	Электр. пар. БИС (статические и динамические параметры по техн. услов.).	Краска маркировочная, спирт этиловый ректификат; батист отбеленный мерсеризованный.	Измерительные установки для контроля и разбраковки БИС.

Допускается замена на аналогичный кристалл ВЕL 23 с двухслойной металлизацией.



Таблица П.3.

**Виды и причины дефектов (наиболее типичных) на различных операциях технологического процесса изготовления полупроводниковых микросхем на биполярных транзисторах.**

Наименование операции.	Виды дефектов.	Причины появления дефектов.	Примечания.
1	2	3	4
1. Резка слитка кремния на пластины	Неплоскостность отрезаемых пластин более допустимой (а)*; сколы, трещины (на поверхности пластины) с размерами более допустимых (б); геометрические параметры и глубина нарушенного слоя поверхности пластины не соответствуют допустимым (в); отклонение от кристаллографической ориентации более допустимого (г).	Изменение жесткости крепления режущего инструмента в процессе резки (а); увеличение радиального биения режущей кромки более допустимого (б); не оптимально выбраны режимы резания (такие как скорость резания, рабочая подача слитка и расход смазочно-охлаждающей жидкости) (в); неточность разворота оправки относительно режущего инструмента (г).  * - Обозначения в скобках (в графах 2 и 3) следует понимать : дефект (а) вызван причиной (а) и т. д.	Причины дефектов указаны для резки слитков алмазным кругом с внутренней режущей кромкой. Для слитков диаметром более 150 мм применяют резку алмазной ленточной пилой, режущую кромку которой изготавливают по всей протяженности ленты либо в виде отдельных сегментов. Последнее, как и сам способ реализации резки в этом случае, при определенных условиях существенно влияет на качество получаемых пластин. После резки слитка шероховатость поверхности пластин составляет 2,0-3,0 мкм.
2. Шлифование пластин кремния.	Дефекты геометрической формы пластины: неплоскостность, непараллельность сторон, прогиб, разброс по толщине более допустимых (а); наличие сколов на кромках пластин (б).	Износ шлифовальников более допустимого (а); нарушение режима шлифования (рабочего давления на пластины, скорости вращения шлифовальника, постоянства температуры в зоне шлифования, либо постоянства вязкости абразивной суспензии по времени) (а, б); отсутствие контроля состояния сепараторов, удерживающих пластины при шлифовании (б).	В случае крепления пластин к шлифовальной головке (при шлифовании несвободным абразивом) причиной дефектов могут быть также неравномерность толщины клеящего слоя, недопустимый разброс толщин одновременно шлифуемых пластин и др. После шлифования шероховатость пластин составляет 0,2-0,5 мкм.

1	2	3	4
3. Полирование пластин.	Геометрические параметры пластин (диаметр, толщина, длина базового среза, непараллельность сторон, плоскостность, прогиб) не соответствуют допустимым (а); отклонение от кристаллографической ориентации более допустимого (б); количество и суммарная длина рисок более допустимых (в); количество частиц загрязнений на пластине более допустимого (г).	Износ полировальника более допустимого; неплоскостность установки полировальника более допустимой (а, б); внесение инородных частиц и пузырьков воздуха под пластину при ее наклеивании на планшайбу (а, б); наличие уплотненных загрязнений на поверхности полировальника (а, б); нестабильность (снижение) температуры при финишном полировании (в); наличие структурных нарушений (г).	Структурные нарушения, вносимые абразивной обработкой (поверхностный рельеф, трещины, пластически деформированные области и т.д.) выявляются и минимизируются на этапе отработки данной технологической операции. Шероховатость поверхности пластин после финишного (химикомеханического) полирования составляет менее 0,05 мкм.
4. Химическая обработка пластин.	Остатки загрязнений в виде разводов, пятен, подтеков и т. д. (а); количество точечных инородных включений (в том числе адсорбированных ) более допустимого (б); количество гидрофобных загрязнений более допустимого (в).	Нарушены режимы финишной промывки проточной и деионизованной водой и сушки пластин (а); некачественная отмывка в кислотных моющих растворах (б); нарушены режимы очистки в неполярном органическом растворителе и промежуточной промывки (в).	Степень чистоты поверхности пластин после очистки в условиях производства определяется количеством светящихся точек в поле зрения микроскопа (обычно в темном поле при косом освещении); наличие жировых (гидрофобных) загрязнений оценивают по времени смачиваемости (либо углу смачивания) поверхности пластины. Очистка - многократно повторяющаяся операция на разных этапах изготовления микросхем, поэтому очистительные среды могут быть разными в зависимости от типа загрязнений, вносимых и остающихся на предыдущей операции.

1	2	3	4
5. Термическое окисление пластин.	Толщина окисла не соответствует заданной (а); наличие матовости в пленках SiO <sub>2</sub> (б); наличие разводов, инородных включений (в).	Нарушение температурно-временных режимов процесса окисления (а); повышенная дефектность исходной пластины (б, в); несоблюдение чистоты проводимого процесса (в частности технологической среды) (б, в).	Другие дефекты, например, повышенная пористость, недопустимые электрофизические характеристики границы раздела Si-SiO <sub>2</sub> , линии скольжения, коробление пластин, контролируют и устраняют на этапе обработки технологического процесса.
б. Фотолитография по слою SiO <sub>2</sub> .	Несовмещение топологического рисунка более допустимого (а); нарушения геометрии топологических элементов более допустимых (б); наличие недотравленных участков SiO <sub>2</sub> в зонах травления (в); наличие макродефектов (царапин и др.) в слое SiO <sub>2</sub> (г); растравливание окисла (ширина клина травления) более допустимого (д); уход линейных размеров топологических элементов более допустимого (е); воспроизводимость размеров контролируемых элементов не соответствует заданной по точности (ж).	Сбой в работе системы контроля точности совмещения (либо ошибка оператора) (а); дефекты фотошаблона либо загрязнения (б, в, г); нарушение технологии процесса травления (б, в, д); недопустимо большой зазор между фотошаблоном и пластиной (д, е); нарушение режима проявления (д, е); недостаточная адгезия фоторезиста к пластине (е, ж); разброс по толщине слоя фоторезиста более допустимого (ж); посторонние включения в слое фоторезиста (з).	При температуре задубливания более 145 <sup>0</sup> С в слое фоторезиста происходят терморезистивные превращения, в результате которых он теряет способность растворяться в органических растворителях, что усложняет удаление использованной маски.

1	2	3	4
7. Диффузия примесей в кремний.	Величина боковой диффузии более допустимой (а); наличие эрозии (б); неравномерность диффузионного фронта по глубине более допустимой (в); образование промежуточных фаз на поверхности диффузионных областей (г); значения $\rho_s$ и $X_j$ и их разброс по пластине не соответствуют допустимым (д).	Скопление дислокаций в приповерхностном слое (а, в, д); завышение расхода диффузанта в технологической среде при отсутствии кислорода (б, в, г); неоптимален температурно-временной режим процесса диффузии (д); нарушение герметичности системы подачи газов (б, в).	На границах диффузионных областей при высоком уровне легирования возможно появление внеконтурных дислокаций несоответствия; краевые и винтовые дислокации возможны, если уровень напряжений кристаллической решетки (из-за отличия размеров атомов примеси и полупроводника) превышает предел текучести материала; микродефекты и линии скольжения выявляют селективным травлением и определяют их среднюю плотность по подсчетам числа микродефектов в нескольких полях зрения микроскопа; структурные дефекты обычно выявляют и минимизируют при отработке технологического процесса.
8. Эпитаксиальное наращивание слоя кремния.	Плотность дефектов упаковки и дислокаций более допустимой (а); значения $\rho_v$ и толщины эпитаксиального слоя не соответствуют допустимым (б).	Наличие на поверхности пластины различного рода загрязнений, механических нарушений и т.д. (а, б); кристаллографическое несоответствие и разная степень легирования пластины и эпитаксиальной пленки, а также высокий уровень механических и термических напряжений (а, б); несоблюдение режима процесса эпитаксии (а, б).	Дефекты роста типа пирамид, бугорков и др. появляются на поверхности пластин при высоких уровнях легирования эпитаксиального слоя либо при наличии инородных частиц на поверхности пластины.

1	2	3	4
9. Ионное легирование кремния с последующей термообработкой.	Локально аморфизированные участки в легированных областях (а); удельное поверхностное сопротивление не соответствует допустимому (б).	Энергия ионного пучка превышает требуемую (а); доза облучения и плотность тока ионного пучка не соответствуют допустимым значениям (б).	Другие дефекты, например, скопления вакансий, дислокации и т.д. обнаруживаются с применением электронной микроскопии либо рентгеноструктурного анализа на этапе отработки технологических режимов ионного легирования
10. Вакуумное напыление слоя металлизации.	Пятна, разводы, инородные включения, пустоты, царапины с размерами более допустимых на единицу площади пластины (г); разброс по толщине слоя металлизации и $\rho_s$ не соответствуют допустимым (а); структура пленки не соответствует эталонной (б); адгезионная прочность менее допустимой (в).	Наличие загрязнений и дефектов на пластине перед напылением (а, б, в, г); остаточное давление в рабочей камере выше допустимого (а, б, в); наличие градиентов температуры по поверхности пластины (а, б, в); неоптимально выбрана скорость осаждения (а, б, в); неоптимальна энергия и плотность молекулярного потока (а, б, в, г).	Причины появления дефектов при вакуумном напылении могут также быть связаны со способом переноса материала металлизации и спецификой конструкции рабочей камеры

1	2	3	4
11. Фотолитография по слою металлизации.	Геометрические размеры проводящих элементов не соответствуют допустимым (а); "перемычки" между элементами металлизации (неотравленные участки) с размерами более допустимых (б); несовмещение элементов металлизации с контактными окнами и др. элементами структуры микросхемы более допустимого (в); пустоты или царапины с размерами более допустимых на элементах металлизации (проводящих дорожках, контактных площадках и т.д.) (г); признаки коррозии и отслаивания элементов металлизации (д).	Нарушение режима задубливания фоторезиста (недостаточная его адгезия к проводящему слою) (а); неправильное соотношение компонентов в травителе либо нарушение режима травления (а, б); протекание электрохимических процессов в системе Al - Si - травитель (д); некачественное проявление (а, г); дефекты фотошаблона (а, б, г); увеличение межоперационного времени хранения (д); наличие локальных загрязнений и инородных включений, внесенных на начальных операциях фотолитографии и (или) перед напылением проводящего слоя (д); отсутствие должного контроля точности совмещения (в).	При выполнении фотолитографии особое значение имеет чистота атмосферы производственного помещения (не ниже 10 и 100 классов чистоты), т.к. осаждение загрязнений (посторонних частиц) из атмосферы на объект производства и фотошаблон приводит к переносу и суммированию дефектов после экспонирования фоторезиста и до завершения технологического цикла.
12. Осаждение межслойного диэлектрика и защитного покрытия.	Разброс по толщине слоя более допустимого (а); пустоты, царапины, каналы, кристаллические включения, инородные включения с размерами более допустимых на единицу площади пластины (б).	Наличие повышенных температурных градиентов на осаждаемой поверхности в процессе формирования данных покрытий (а, б); несоблюдение технологии (а, б); отсутствие контроля чистоты материалов технологических сред (б).	Параметры, характеризующие изолирующие и пассивирующие свойства диэлектрических покрытий оценивают при отработке технологий осаждения диэлектрических покрытий.

Окончание табл. П.3.

1	2	3	4
<p>13. Функциональный контроль микросхем</p>	<p>Функциональные параметры микросхемы не соответствуют заданным по техническим условиям.</p>	<p>Проявление в присутствии электрического поля и эффектов типа: электромиграции частиц алюминия, дрейфа ионов инородных примесей, туннелирования, разрастания кристаллитов, например, алюминия и др., приводящих к утечкам тока в диэлектриках и р-п переходах; к проколу р-п переходов, разрывам разводки в элементах, повышению контактного сопротивления, коротким замыканиям между уровнями металлизации и др. Появление структурных дефектов в полупроводнике в результате влияния градиентов температуры и механических напряжений, что приводит к появлению дополнительных энергетических уровней в запрещенной зоне и, соответственно, к неуправляемому изменению проводимости, времени жизни, генерации и рекомбинации носителей заряда.</p>	<p>Для повышения качества готовых структур микросхем обычно осуществляют межоперационный (промежуточный) контроль по тестовым элементам микросхемы, на которых измеряют вольт - амперные характеристики (ВАХ) с применением измерительных установок, оборудованных специальными зондовыми головками. По виду ВАХ можно не только выявлять и классифицировать дефекты, но и судить о настроенности и отработанности всего технологического процесса изготовления микросхем.</p>

## Список рекомендуемой литературы

1. ГОСТ 17021-88. Микросхемы интегральные. Термины и определения.
2. Угай Я. А. Введение в химию полупроводников. М.: Высш. шк.", 1975.
3. Пичугин И. Г. Таиров Ю. М. Технология полупроводниковых приборов. М.: Высш. шк., 1984.
4. Пузырев В.А. Управление технологическими процессами производства микроэлектронных приборов. М.: Радио и связь, 1984. 160с.
5. Моро У. Микролитография: В 2 ч., /Пер. с англ. М.: Мир, 1990. Ч. 1,2
6. Курносое А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1979.
7. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. М.: Радио и связь, 1987.
8. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. М.: Радио и связь, 1989.
9. Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. Радио и связь, 1986.
10. Парфенов О. Д. Технология микросхем. М.: Высш. шк., 1986.
11. Технология СБИС: В 2 кн. Пер. с англ. М.: Мир, 1986.
12. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. М.: Радио и связь, 1991.
13. Сугано Т., Икома Т., Такэиси Е. Введение в микроэлектронику, /Пер. с яп. М.: Мир, 1989.
14. Козырь И.Я., Горбунов Ю.И., Чернозуб Ю.С., А.С. Пономарев. Общая технология. Из серии: Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. Кн. 1. М.: Высш.шк., 1989.

Редактор В.Л. Родищева

Подписано в печать 7.12.2006. Формат 60x84<sup>1/16</sup>.  
Бумага писчая. Усл. печ. л. 7,91. Уч.- изд. л. 8,77.  
Тираж 100 экз. Заказ

ГОУВПО Ивановский государственный химико-технологический университет.  
Отпечатано на полиграфическом оборудовании кафедры экономики и финансов  
ГОУВПО "ИГХТУ".

153000, г. Иваново, пр. Ф. Энгельса, 7.